



TITLE:

衛星リモートセンシングデータの 重ね合わせとその応用に関する研 究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

向井, 幸男

CITATION:

向井, 幸男. 衛星リモートセンシングデータの重ね合わせとその応用に関する研究. 京都大学, 1989, 工学博士

ISSUE DATE:

1989-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r6816>

RIGHT:

衛星リモートセンシングデータの
重ね合わせとその応用に関する研究

1988 年

向 井 幸 男

衛星リモートセンシングデータの
重ね合わせとその応用に関する研究

1 9 8 8 年

向 井 幸 男

DOC
1988
19
電気系

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の目的および意義	1
1.2 研究の概要および本論文の概要	3
1.3 人工衛星によるリモートセンシング	5
1.3.1 ランドサットの概要	7
1.3.2 スポットの概要	8
第2章 衛星データの重ね合わせ	10
2.1 序	10
2.2 2段階リサンプリング法による衛星データの重ね合わせ	13
2.2.1 画像の重ね合わせ手順	13
2.2.2 重ね合わせ対象領域の一次幾何補正画像の作成	15
2.2.3 重ね合わせ用GCPによる高精度の重ね合わせ	18
2.2.4 重ね合わせ用GCPの数と重ね合わせの精度	23
2.2.5 ランドサットMSS画像のバンドと相関処理	24
2.2.6 GCPの地形特徴と相関係数	25
2.2.7 GCPチップ間の相関についての考察	27
2.3 要約	28
第3章 重ね合わせデータの土地被覆分類への応用	31
3.1 序	31
3.2 分光反射特性の違いによる物質の判別	32
3.3 マルチスペクトルデータによる土地被覆分類	34
3.4 重ね合わせによる土地被覆分類精度の向上率の調査	35
3.4.1 土地被覆分類精度の調査方法	35
3.4.2 使用データと重ね合わせ画像の作成	36

3.4.3	土地被覆分類カテゴリーの設定と トレーニング領域の選定	37
3.4.4	重ね合わせデータによる土地被覆分類精度の向上率	38
3.4.5	土地被覆分類画像	53
3.5	要約	53
第4章	重ね合わせデータの差による地表面変化部分の抽出	56
4.1	序	56
4.2	ランドサットデータと地表面変化状況との関係	58
4.3	選別画素間回帰による画像の輝度補正と差画像作成	60
4.3.1	画像処理手順	60
4.3.2	回帰による2つの画像の輝度補正	63
4.3.3	輝度補正画像の作成	65
4.3.4	選別画素の分布	68
4.3.5	他の輝度補正方法との比較	74
4.3.6	差画像作成	74
4.4	要約	75
第5章	差画像による地表面変化部分抽出への応用	79
5.1	序	79
5.2	対象領域と使用データ	80
5.3	松くい虫の被害領域抽出手順	82
5.4	松の領域の抽出	84
5.5	松くい虫の被害によるランドサットデータの変化特性の調査	84
5.6	松くい虫の被害領域の抽出	87
5.7	被害領域の抽出結果の評価	91
5.8	今後の課題	93
5.9	本章の要約	95

第6章 異方向観測データの重ね合わせによる地表面高度の算出	98
6.1 序	98
6.2 衛星データによる高度の自動算出の基本原理	100
6.3 テストサイトと対象シーンの選定	102
6.4 システム補正データによる高度算出	104
6.5 基準面重ね合わせ画像の作成と画像座標から 緯経度座標への変換式の計算	106
6.6 1次格子点の対応点の探索と緯経度座標への変換	106
6.7 対応点観測時の衛星の位置計算	109
6.7.1 ランドサットTMデータの場合	109
6.7.2 スポットデータの場合	110
6.8 地球固定座標における高度の算出	111
6.9 1次格子点の高度画像の作成	114
6.10 2時格子点の高度算出	114
6.11 高度算出評価点による算出高度の誤差	117
6.11.1 ランドサットTMデータの場合	117
6.11.2 スポットデータの場合	119
6.12 地形図の等高線との重ね合わせ	121
6.13 本高度算出システムの誤差要因と各要因による算出高度の誤差	122
6.14 本章の要約	125
第7章 衛星データによる地表面高度の算出における課題の研究	130
7.1 序	130
7.2 異常高度点の対応策の研究	131
7.2.1 研究手順	131
7.2.2 異常高度点の画像の地形特徴の調査	133
7.2.3 テストポイントの選定	133
7.2.4 判別分析による異常／正常高度点の 相関領域の画像の特徴調査	139

7.2.5	相関領域を大きくした場合の効果の調査	143
7.2.6	分散と相関係数による異常高度点対策	145
7.3	異高度基準面G C Pによる高度算出	148
7.3.1	異高度基準面G C Pによる立体視画像作成	148
7.3.2	異高度基準面G C Pによる高度算出の評価	151
7.4	本章の要約	151
第8章	結論	156
8.1	衛星データの重ね合わせ(第2章)	156
8.2	重ね合わせデータの土地被覆分類への応用(第3章)	157
8.3	重ね合わせデータの差による地表面変化部分の抽出(第4章)	158
8.4	差画像による地表面変化部分抽出への応用(第5章)	159
8.5	異方向観測データに地表面高度の算出(第6章)	160
8.6	衛星データによる地表面高度の算出における 課題の研究(第7章)	161
謝辞		163
参考文献		164
著者発表論文		177

第1章 序論

1.1 研究の目的および意義

宇宙船ジェミニの飛行士が遥かな宇宙から地球を撮った1枚の写真が宇宙から地球を観るという新たな発想をもたらした。この写真を基に宇宙から地球を観測する衛星（ERTS-1後にランドサット1号と改称）が計画され、1972年7月米国によって打ち上げられた。ERTS-1が送って来た観測データは驚くほど鮮明に地球表面の状況を捉えていた。それ以来衛星リモートセンシングデータ（衛星に搭載したセンサーにより観測したデータ、以後衛星データと記す）を土地利用状況調査、植生分布調査、地下資源探査、海洋汚染調査や海面温度分布調査等人間生活の色々な分野に応用するための研究が盛んに行われて来た。衛星データは同時広域性、繰り返し観測性の特徴を持っており、同一の地域を別々の時期に観測したデータが多く得られ、これらのデータを重ね合わせるにより色々な目的に応用することが出来る。

重ね合わせデータを使用した場合の応用ケースとしては次の様な場合がある。

(1) 重ね合わせデータによる土地被覆分類

土地被覆物は環境条件が変わると違った分光反射特性を示す。特に草地、農地など植生でおおわれた部分は季節が異なるとかなり異なった反射特性を示す。従って異なった時期に観測されたデータを重ね合わせてマルチスペクトル分類を行うことにより土地被覆の分類の精度を向上させることが出来る。

(2) 重ね合わせデータの差による地表面変化部分の抽出

重ね合わせデータから各観測時期の日射強度の相異を補正した後、画素毎に輝度レベルの差の画像を作成し、その差画像から地表面が変化した部分を抽出する。差画像を使用する事により病虫害による被害領域の段階的抽出など観測データの値が変化した部分を、その程度により段階分けしながら抽出することが出来る。

(3) 異方向観測データの重ね合わせによる地表面高度の算出

リモートセンシングデータの応用方法の1つとして同一地域を異なった方向から観測したデータを使って立体視を行いその地域の高度算出に応用することが出来る。高度算出の際に基準となる平面を設定し、異なった方向から観測したデータを基準高度面で重ね合わせた画像（立体視画像）を作成する。立体視画像間で互に対応する点を自動的に探索し、対応点の位置とその点を観測したときの衛星の位置から対応点の高度を算出する。

本研究は衛星データを上の3つのケースに応用する場合のデータ処理手法及び、その手法を応用した場合の衛星データの有効性あるいはデータ処理手法上の課題について研究したものである。

ランドサットは1972年以来約3年毎にその後続衛星が打ち上げられ現在4号と5号が観測データの収集を行っている。その後1986年2月にはフランスの地球観測衛星スポット1号、1987年2月には日本の海洋観測衛星MOS-1が打ち上げられ、それぞれ観測データの収集を開始した。これらの衛星により過去の地球表面の状況が観測され記録されており将来も観測され続けるであろう。本研究で行った重ね合わせデータから地表面の変化した部分を抽出する研究は衛星データを使って地球表面の変化状況を監視するのに有意義な研究である。限りある地球の資源を有効に利用して行くために今後地球表面の変化状況を監視して行くことは重要なことである。

スポットは地表面を斜めに観測することが出来るようになっていて、この機能により地表面の高度を計測することを主目的とした衛星である。又1990年代始めに我が国が打ち上げようとしている地球資源衛星（ERS-1）にも地表面の高度を計測するための立体視機能が用意されている。本研究で行った衛星データによる地表面高度の算出の研究は上記の衛星の観測データを使って、地表面の数値地形データ（一定間隔の格子点の高度のデータ）を作成するのに非常に有意義な研究である。数値地形データを整備することにより等高線図、国土断面図、景観図等を容易に作成することが出来、国土開発事業の評価など色々な面に有用である。

1.2 研究の概要および本論文の構成

本研究は次の6つの項目から成る。

- (1) 衛星データの重ね合わせ
- (2) 重ね合わせデータの土地被覆分類への応用
- (3) 重ね合わせデータの差による地表面変化部分の抽出
- (4) 差画像による地表面変化部分抽出への応用
- (5) 異方向観測データの重ね合わせによる地表面高度の算出
- (6) 衛星データによる地表面高度の算出における課題の研究

研究項目(1)は衛星データを1. 1項の応用ケース(1)に応用する場合のデータ処理手法について研究したものである。まず小数の基準GCPを用いて粗く重なった地理補正画像を作成し、次に多数の重ね合わせ用GCPを用いて高精度に重ね合わせる2段階処理方式を採用することにより重ね合わせデータを迅速に作成できることを示した。また重ね合わせ用GCPの数と重ね合わせの精度との関係について調査し、重ね合わせ用GCPを約20点選定することにより、重ね合わせの精度は1画素程度になり、GCPの数をさらに増やしても精度はそれほど良くなることを示した。

研究項目(2)は項目(1)で研究したデータ処理手法の応用研究であり、重ね合わせデータ使用による土地被覆分類精度の向上率について研究した。同季節および異季節の重ね合わせの場合について調べ、同季節の場合でも分類精度が向上することを示し、その理由について考察した。また、土地被覆カテゴリーを幾つかの系に大別し、重ね合わせデータ使用による分類精度の向上率を各系毎に調べた。

研究項目(3)はデータを1. 1項の応用ケース(2)に応用する場合のデータ処理手法について研究したものである。重ね合わせデータから差画像を作成する場合、各データ観測時の日射強度の相異などによる輝度の違いを補正した後、差をとる必要がある。輝度補正の方法として、地表面が変化していない部分の画素を自動的に選別し、その部分の画素のデータを使って回帰により補正する方法を提案した。この補正により地表面が変化していない部分は回帰により輝度が同じになり、変化している部分は同じにならない。従って差画像において

地表面が変化した部分は平均値からずれた位置に来ることになり、抽出され易くなる。

研究項目(4)は項目(3)で研究したデータ処理手法の応用研究であり、ランドサットMSSデータによる松くい虫の被害領域を抽出する研究を行った。2時期の重ね合わせデータからマルチスペクトル分類により松の領域を抽出しておき、次にその松の領域の中から重ね合わせデータの差画像を使って被害によりランドサットデータが変化した部分を抜き出して、松くい虫の被害領域とした。ランドサットデータの変化量の度合いにより被害の程度を3段階に分けた。この結果を地上で調査した被害量のデータを使って評価してみると、或る程度被害が大きくなればランドサットデータは松くい虫の被害領域の抽出に有効であることを示した。

研究項目(5)は衛星データを1. 1項の応用ケース(3)に応用した場合のデータ処理手法の研究である。高度がほぼ同じの基準面GCPを選定して立体視画像を作成し、立体視画像間の対応点の座標から衛星位置を求めることにより、地表面の高度を自動的に算出する方法を研究した。対応点の座標を基準面GCPの標定情報を使って地球固定座標に変換し、また対応点観測時の衛星位置もシステム補正時の衛星位置推定データを使って地球固定座標で求め、高度を地球固定座標で3次元的に算出する方法を開発した。評価点による算出高度の誤差の調査および誤差の要因分析を行った。衛星データによる算出高度の画像と地形図から抽出した等高線図を重ね合わせてみると両者はかなり良く合致していた。

研究項目(6)は項目(5)で研究した高度算出方法を将来衛星データによる地形図作成に応用する場合の課題について研究したものである。立体視画像間の対応点の探索において、相関基準画像の分散とマッチング時の相関係数を調べることにより、異常高度点の発生を少なくする高度算出手順を提案し、ランドサットTMデータを使って実際に異常高度点を少なくすることが出来ることを示した。また高度の異なる基準面GCPを用いて立体視画像を作成して高度を算出する方法を提案し、スポットデータを使ってこの方法により算出高度の精度が改善できることを示した。

本論文は8章から成る。

第1章は序論であり研究の目的と意義を述べた後、人工衛星によるリモートセンシングの特長及び、本研究で利用したランドサットデータおよびスポットデータの概要について簡単に説明した。

第2章から第7章までは、それぞれ研究項目(1)から(6)までの研究結果を各章毎に記述した。各章の最初に序の項を設け、該当する研究項目に関して既往の研究を概観した後、本研究の既往の研究との違い、特色を簡単に説明した。研究内容の説明方法としては、先ず各研究項目に対して著者の行った研究方法あるいはデータ処理手順を箇条書きの形で説明した。以後その手順を追って研究結果を記述した。各章の最後に本章の要約を設け、各章の要点をまとめて記述した。第8章は結論として、本研究で得られた主要な成果をまとめて記述した。

1.3 人工衛星によるリモートセンシング

リモートセンシングとは広義的には「観測対象に直接手を触れないで対象に関する情報を得る」事を意味し、人間が目により外部世界を認識していることも広い意味でリモートセンシングの範ちゅうに入る。一般に物質は種類や環境条件が異なればそれぞれ異なる電磁波の反射あるいは放射特性を示す。この事実を利用して現在リモートセンシングという言葉は一般的に「航空機や人工衛星に搭載した観測機器（センサーという）により地球表面の対象物から反射又は放射される電磁波を収集し、それらのデータを利用して対象物に関する情報を得る技術」の意味で使用されている。

1839年に写真技術が発明されて以来、気球や航空機にカメラを搭載して地上を撮影し、地上の情報を得る技術の開発とその利用は航空写真測量技術としてずっと行われて来た。人工衛星による地球の観測は1960年代に始まった。アポロ計画の途中のステップとして開発されたマーキュリーやジェミニからの地球観測の経験を基に、地球を本格的に観測する衛星が米国の航空宇宙局(NASA; National Aeronautics and Space Administration)によって計画され、地球資源技術衛星1号(ERTS-1; Earth Resources Technology

Satellite-1)として1972年7月に打ち上げられた¹⁾。ERTS-1の観測データは地球の資源の有限性を認識させると共に地球的規模での資源の管理、環境の監視に有効であることが分かり、以来人工衛星からの観測がリモートセンシングの主流を占める様になった。人工衛星からのリモートセンシングは次のような特徴を持っている。

(1) 同時広域性

高々度の宇宙を高速で飛行しながら観測するため広い地域を短時間で、従ってほぼ同じ条件で観測することが出来る。

(2) 繰り返し観測性

人工衛星は一定周期で同じ軌道に戻って来るため同じ地域を繰り返し観測することが出来、これは環境の監視などに非常に有効な特徴となる。

(3) 優れた幾何学的特性

観測中の姿勢の変動が小さいこと又観測の際の視野角が狭いため観測画像は幾何学的歪みが小さく又地形図に近い形になっている。

ERTS-1は後(1975年1月)にランドサット(LANDSAT)1号と改称され¹⁾、その後続衛星が打ち上げられている。米国に続いてフランスが地球観測衛星スポット1号(SPOT-1; Satellite Pour l'Observation de la Terra-1)を1986年2月に打ち上げており、さらに我が国も1987年2月に海洋観測衛星MOS-1(Marine Observation Satellite-1)を打ち上げた。現在これらの衛星により地球の観測が行われている。将来の地球観測衛星としてはランドサットとスポットの後続衛星としてランドサット6、7号およびスポット2〜4号が計画されている。別の衛星としては欧州宇宙機関(ESA; European Space Agency)がERS-1(European Remote Sensing Satellite-1)を、又我が国も地球資源衛星(ERS-1: Earth Resources Satellite-1、ESAのERS-1と区別するためにJERS-1と呼ぶこと

もある)を計画している。両方とも全天候下で観測することが出来る能動型のマイクロ波センサーを搭載する予定であり、1990年代始めの打ち上げを目指して現在開発が進められている。

本研究においてランドサットとスポットの観測データを使用しているので次にランドサットとスポットについて簡単に説明する。

1.3.1 ランドサットの概要

ランドサットは米国が開発運用している地球観測衛星で1972年に第1号が打ち上げられて以来、順次その後続衛星が打ち上げられ現在4号と5号が運用中である。約700km(ランドサット1~3号では約900kmであった)の上空を南北方向に周回(準極軌道)しながら185kmの観測幅で地球表面のほぼ全域(緯度約82°以下の地域)を帯状に観測している。ランドサットは太陽同期準回帰軌道をとっているため、一定の時刻(公称値午前9時40分)に北から南に赤道を通過しながら、かつ一定(4、5号では16日、1~3号では18日)周期で同一地域を繰り返し観測することが出来る。観測機器としては多重スペクトル走査放射計(MSS; Multispectral scanner, 1~5号)、リターンビームビジコン(RBV; Return Beam vidicon, 1~3号)、およびセマティックマッパー(TM; Thematic Mapper, 4~5号)が搭載され、現在4号ではMSS、5号ではMSSとTMによる観測データの収集が行われている。MSSとTMは光学・機械式スキャナーと呼ばれているもので一定の大きさの地表面(地上分解能という)から反射あるいは放射される光の強さを幾つかの波長域(バンドという)に分けて測定することが出来る。このようにして得られたデータをマルチスペクトルデータという。地上分解能の大きさが最小観測単位となっており、縦横が地上分解能の大きさの地表面からの観測値を画素(またはピクセル)と呼んでいる。ランドサットMSSとTMデータの各バンドの波長域と地上分解能を表1-1に示す。ランドサットの観測データは地上局で受信・処理される。185km幅で連続的に観測されたデータは地上局で170km間隔で区切って1シーンとし、1シーン単位でラジオメトリック補正や幾何補正²⁾を行った後、写真、磁気テープ(CCT)等の形で利用者に提

供される。ランドサットの軌道諸元、観測機器の構造や地上局での観測データの補正処理などの詳細は文献²⁾に説明されている。

表1-1 ランドサットMSSとTMデータの波長域と分解能

センサー	バンド	波長域(μm)	地上分解能(m)	備 考
ランド サット MSS	4	0.5~0.6	80	緑 色
	5	0.6~0.7	80	赤 色
	6	0.7~0.8	80	近赤外
	7	0.8~1.1	80	近赤外
ランド サット TM	1	0.45~0.52	30	青 色
	2	0.52~0.60	30	緑 色
	3	0.63~0.69	30	赤 色
	4	0.76~0.90	30	近赤外
	5	1.55~1.75	30	中間赤外
	6	10.40~12.50	120	熱赤外
	7	2.08~2.35	30	中間赤外

1.3.2 スポットの概要

スポットはフランスが開発した地球観測衛星で、1986年2月に第1号が打ち上げられ現在観測データの収集が行われている。SPOTには2台のHRV(High Resolution Visible imaging instrument)が搭載されておりそれぞれ独立に作動させることが出来る。1台のHRVの観測幅は60kmで2台のHRVが隣接して観測することが出来、その時の観測幅は117km(オーバーラップ3km)である。HRVには3つのバンドで観測するマルチスペクトルモード

と単一のバンドで観測するパンクロマティックモードとがあり、それぞれのモードの波長域と分解能は表1-2に示すとおりである。

スポットの大きな特徴はHRVの観測方向を任意の角度に設定することが出来、これにより地表面を斜め方向から観測(Off nadir viewing)することが出来ることである。この斜め観測により同一の地域を異なった角度で観測した画像を得ることが出来、地表面の高度を求めることが出来る。SPOTは830 kmの高度でランドサットと同じ様に地球を南北方向に周回しながら60 kmの観測幅で地球表面を観測する。太陽同期準回帰軌道をとっており26日周期で同一の軌道に戻って来るが、上述の斜め観測機能を利用して、同一の地域を集中的に観測することにより観測周期を短縮することが出来る。SPOTの観測データは現在フランス、スウェーデン、カナダで受信を行っており我が国は1988年から受信する予定である。幅60 kmで連続的に観測されたスポットデータは地上局で60 km間隔で区切って1シーンとし、1シーン単位でラジオメトリック補正や幾何学補正を行った後、写真、磁気テープなどの形で利用者に提供される。スポットの観測システム、地上局での観測データの補正処理などの詳細は参考文献^{31)・26)}に説明されている。

表1-2 スポットHRVデータの波長域と分解能

モード	バンド	波長域(μm)	地上分解能(m)	備考
パンクロ		0.51~0.73	10	緑, 赤色
マルチ スペクトル	1	0.50~0.59	20	緑色
	2	0.61~0.68	20	赤色
	3	0.79~0.89	20	近赤外

はG C Pからの距離の4乗に比例するとしている¹³⁾。

幾何学モデルによる方法は、観測画像の各画素とそれに対応する地球表面の観測点との幾何学的関係を精密にモデル化し、入力画像と出力画像の座標間の関係式を得ようとするものである。前述の(1)～(3)の歪の要因の中、時間的変動が激しく誤差の大きいのは衛星の姿勢の推定モデルである。幾何モデルによる補正にはシステム補正と精密補正の2種類がある。衛星の姿勢の推定モデルとして衛星の姿勢センサーによる情報のみを使って推定したモデルを使用するのがシステム補正(バルク補正ともいう)であり、G C Pを使って姿勢を推定し直したモデルを使用するのが精密補正である。この場合誤差1画素以下の精度で補正するためにはG C Pは1シーンについて15点程度で良い¹²⁾。殆どのランドサットデータの地上局で基本幾何補正の方法として幾何モデルによる補正方法が採用されており¹²⁾、各地上局でランドサットの各シーン毎に精密補正用のG C P(基準G C Pという)の選定が進められている。モデル化を精密に行うことにより1シーン内で数個のG C Pで精密に補正する方法⁹⁾、¹²⁾、¹⁴⁾も提案されている。我が国の宇宙開発事業団地球観測センター(NASDA EOC; National Space Development Agency of Japan, Earth Observation Center)では基本幾何補正の方法として幾何学モデルによる方法を採用しており、その手順については文献²⁾に詳しく説明されている。

衛星データは同時広域性、繰り返し観測性の特長を持っており、同一地域を異なった時期に観測した複数のデータを重ね合わせる技術は頻繁に使用され、応用技術として非常に重要な基本的技術である。衛星データは地上局で基本幾何補正されているが、ランドサットM S S画像の場合、精密補正で1～2画素⁵⁾、¹⁵⁾(1画素は57×57m)、システム補正で約20画素¹⁵⁾の誤差がある。一般に利用者はシステム補正データを利用することが多く、システム補正データをそのまま重ね合わせたのでは誤差が大きい。

画像の重ね合わせ技術は基準画像と重ね合わせようとする画像の間で特徴的な点(重ね合わせ用G C Pという)の対応点を測定し、それらの誤差を最小にする多項式を求めて画像を変換すれば良い⁵⁾、⁹⁾。画像の重ね合わせについて

もこれまで多くの研究^{5), 9), 7), 17), 18), 19), 20), 21)}がなされており、これらの研究の多くは2つの画像間の対応点の探索方法に関するものである。画像間の対応点の探索において最も古典的な方法は相関係数による方法であるが、これは非常に演算時間がかかる。BerneaらはSSDA法により演算時間を2ケタ以上短縮できることを示し²¹⁾、Bernsteinは基本幾何補正にSSDA法を使用した⁵⁾。他の探索方法としてはEdge Correlation法⁷⁾、Normalized SSDA法¹⁷⁾、相関係数をFFTを使って計算する方法²²⁾などがある。Bennyは内捜により対応点の座標を0.1画素の細かさで求めることが出来るとしている²⁰⁾。画像の重ね合わせ誤差として約1/4画素⁵⁾、約1画素¹⁸⁾、約2画素¹⁵⁾の報告がある。

基本幾何補正された画像は縦方向が衛星の進行方向、横方向が走査方向になっており、上が真北方向になった地形図にそのまま重なるようになっていない。地形図に重なるように補正（地理補正と呼ぶ）することにより、行政区画領域や国土数値情報と重ね合わせることが出来、画像利用の有効性が非常に増大する。

本研究では、ランドサットMSSのシステム補正データから、2段階リサンプリング（画像を新しい座標で再配列することをいう）法により広い範囲の高精度に重なった2つの地理補正画像を迅速に作成出来ることを示した。第1段階で粗く重なった地理補正画像の作成を行い、第2段階でGCPの自動探索により高精度に重ね合わせる方法を開発した²³⁾。2段階方式の利点は第1段階の粗い重ね合わせにより画像間の拡大、回転などの歪を除いておき、第2段階でのGCPの自動探索の成功率を高めることが出来ることである。自動探索には相関係数法を用いた。

重ね合わせ用GCPとは別に評価点を選定し、GCPの数を変えて評価点での精度を調べた。重ね合わせ用GCPを約20点選定することにより重ね合わせの誤差を1画素程度にすることが出来る。重ね合わせ誤差が1画素程度であるのは、重ね合わせ用GCPおよび評価点の座標を探索時間を早くするため1画素単位の精度で求めたためである。1画素以下の精度で求めれば誤差はもっと小さくなると考えられる。又相関処理に適したランドサットMSSのバンド、

G C P の地形的特徴と相関係数との関係などについて調査した。

2.2 2段階リサンプリング法による衛星データの重ね合わせ

2.2.1 画像の重ね合わせ手順

2段階リサンプリングによる画像の重ね合わせ手順を図2-1に示す。

(1) ランドサットの原画像 R 1 と R 2 から重ね合わせ対象領域を共通の地図座標でリサンプリングした地理補正画像（1次幾何補正画像という）を作成する。重ね合わせ対象領域周辺の G C P（通常精密補正用に選定された基準 G C P を使用する）の画像座標と地図座標の測定値からそれぞれの画像に対する地図座標でのリサンプリング式を求める。

(2) (1) で求めたリサンプリング式を使って原画像 R 1 と R 2 から重ね合わせ対象領域を地図座標上でリサンプリングした1次幾何補正画像 T 1 および T 2 を作成する。1次幾何補正画像は地図座標でリサンプリングされているので、上が真北方向になっていて地形図に重ね合わせることが出来る画像になっている。このリサンプリング式としては1次のアフィン変換式を使用した。

(3) 対象領域が広い場合画像 T 1 と T 2 は全域でぴったり重なっていることは少ないので、次に画像 T 1 を基準にして画像 T 2 をぴったり重ねるための処理を行う。重ね合わせ用 G C P を画像全域において万遍なく存在するように選定し、それらの G C P の画像 T 1 と T 2 における画像座標を自動探索技術を用いて測定する。重ね合わせ用 G C P は基準 G C P のように地理的位置が分かっている必要はなく、両方の画像での対応点が分かる程度に画像上でなんらかの特徴を持った点であれば良い。

(4) 重ね合わせ用 G C P の画像 T 1 と T 2 での画像座標の測定値から T 1 を基準にして T 2 を T 1 に重ねるためのリサンプリング式を求める。

(5) (4) で求めたリサンプリング式を使って画像 T 2 を再度リサンプリングした画像 T 2' を作成する。このリサンプリング式としては3次式を使用した。このように2段階のリサンプリング処理を行うことにより2つの画像を高精度（1画素以下のずれ）に重ね合わせることが出来る。

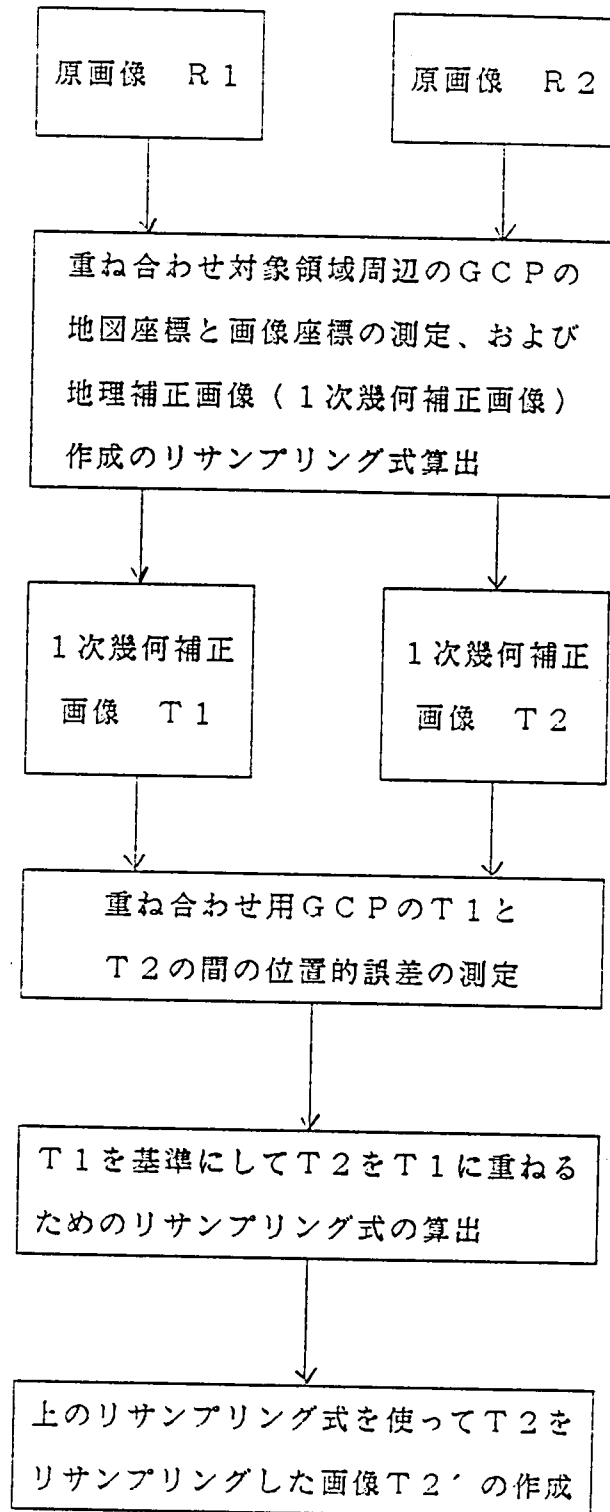


図 2 - 1 画像の重ね合わせ手順

2.2.2 重ね合わせ対象領域の1次幾何補正画像の作成

基準GCPはランドサットの各シーン毎に十数点選定されていて、基準GCPの原画像における座標を測定し、その値と地図座標の値から最小自乗法により1次幾何補正画像作成のためのリサンプリング式を求める。基準GCPの画像座標は通常CRT上にその周辺を含めた領域を拡大表示して目視により測定する。地図座標は地形図からその経緯度を求める。1次幾何補正画像の座標としては地形図に合致した座標(地図座標)が用いられる。地図座標を使用することにより解析結果の座標を地形図や国土数値情報等と重ね合わせることが出来て便利だからである。地上局で基本幾何補正されたランドサット画像の座標は衛星の軌道方向と直角方向になっており、図2-2に見るように北を上にした地図座標とは少し座標軸が傾いている。

緯経度座標(ϕ 、 λ)は球面座標であり、画像座標(p 、 l ;ピクセルとライン)は平面座標なので両座標はUTM座標(u 、 v)を介して関連づけられる。UTM座標は緯経度座標を近似式で平面に変換した座標である。この3つの座標を次の式で関係づける。

$$u = f_1(\phi, \lambda), \quad v = f_2(\phi, \lambda) \quad (2-1)$$

$$p = g_1(u, v), \quad l = g_2(u, v) \quad (2-2)$$

f_1 、 f_2 は緯経度座標をUTM座標に変換する式であり、ガウスクリューゲルの投影式^{24)、25)}で与えられる。 g_1 、 g_2 はUTM座標を画像座標に変換する式である。基準GCPの緯経度データから(2-1)式によりそれに対する u 、 v を求め、その値と測定された原画像における画像座標(p 、 l)を(2-2)式に代入して観測方程式を作成し、最小自乗法により g_1 、 g_2 を求める。

g_1 、 g_2 としては次に示すアフィン変換式

$$p = a_1 u + a_2 v + a_3, \quad l = b_1 u + b_2 v + b_3 \quad (2-3)$$

を採用しリサンプリングはNearest Neighbor法(文献²⁾、pp 2-45)によった。原画像R1、R2として1980年11月11日および1972年11月26日に観測されたシステム補正済みのランドサットMSSの東京のシーン(Path-Row 115-35)の画像を使用し、その中の北緯35°30'と36°30'お

よび東経 $139^{\circ}37'30''$ と $140^{\circ}52'30''$ で囲まれた約 110 km 四方の矩形の領域を重ね合わせの対象領域とした。基準GCPとしては東京のシーンに選定された16点のGCPを使用して(2-3)式に示すリサンプリング式を求め重ね合わせ対象領域の1次幾何補正画像T1とT2を作成した。UTM座標として東経 141° の子午線を中央経線とした54ゾーンを選定して、画像T1とT2を作成したときの(2-3)式の係数を表2-1に示す。1980年および1972年の原画像はそれぞれNASDA EOCおよび米国のEROS DATA CENTERで処理された画像なので、両者の係数はかなり違っている。

表2-1 画像T1とT2を作成した時のリサンプリング式の係数

係数	画像T1 1980年11月1日	画像T2 1972年11月26日
a_1	-0.356168×10^{-2}	$-0.4531598 \times 10^{-2}$
a_2	$-0.1716576 \times 10^{-1}$	0.1671609×10^{-1}
a_3	0.8579437×10^4	0.1253377×10^5
b_1	$-0.1716749 \times 10^{-1}$	$-0.1227219 \times 10^{-1}$
b_2	$-0.3553195 \times 10^{-2}$	$-0.2487048 \times 10^{-2}$
b_3	0.7126413×10^5	0.5092765×10^5

この段階でT1とT2の重ね合わせの誤差は評価用GCPの誤差のrmsで2画素程度(表2-3のGCPの数0の場合参照)であった。東京のシーンにおける基準GCPの位置と重ね合わせ対象領域の位置を図2-2に示す。リサンプリングは2万5千分の1の地形図1枚分の領域(横方向 $7.5'$ 、縦方向 $5'$)単位で行い、それが200ピクセル \times 200ラインになるようにしたので、画像T1とT2の大きさは2000ピクセル \times 2400ラインとなった。1画素の実際の地表面での大きさは約 56 m (横方向) \times 46 m (縦方向)に相当す



図 2-2 ランドサットシーン東京 (PATH-ROW 115-35) に選定されている基準 GCP (・印) の位置と重ね合わせ対象領域

る。

2.2.3 重ね合わせ用GCPによる高精度の重ね合わせ

(1) 重ね合わせ用GCPと評価用GCPの選定

重ね合わせ用GCPは基準GCPのように地理的位置が分かっている必要はなく、画像T1とT2の間で対応がとれるような点を次のような基準で選定すれば良い。

- ・なるべく画像全域に万遍なく存在するように選定する。
- ・対応点の探索はGCPの周りの小領域の画像を使って行うので川のゆるやかな屈曲部等の様に厳密に1つの点に限定せずに点を含めた小領域の部分を選定すれば良い。

また重ね合わせ精度を評価するための評価用GCPを重ね合わせ用GCPのなるべく中間点に位置するように選んだ。対象領域において重ね合わせ用GCPを60点、評価用GCPを23点選定した。それらの位置を図2-3に示す。

(2) 基準画像のGCPチップの作成

選定された重ね合わせ用GCPおよび評価用GCPの位置を中心としてその周辺の 32×32 画素の範囲の4つのバンドの画像データを基準画像T1から切り出した。切り出されたGCPの周りの小領域の画像をGCPチップと呼ぶ。基準画像のGCPチップには画像の認識名を付けておき検索可能なようにしておく。画像データ量としてはGCP1点で4KBであり、それほど多くないので、基準画像のGCPチップをGCPライブラリーとしてディスク上に蓄えておくことが出来る。

(3) 相関係数による重ね合わせ用GCPの対応点の自動探索

次に画像T2（探索画像という）における重ね合わせ用GCPの基準画像のGCPチップに最も良く合致（マッチング）する位置（対応点という）を求める。選定した位置を対応点の予測位置としてそこを中心として 32×32 画素

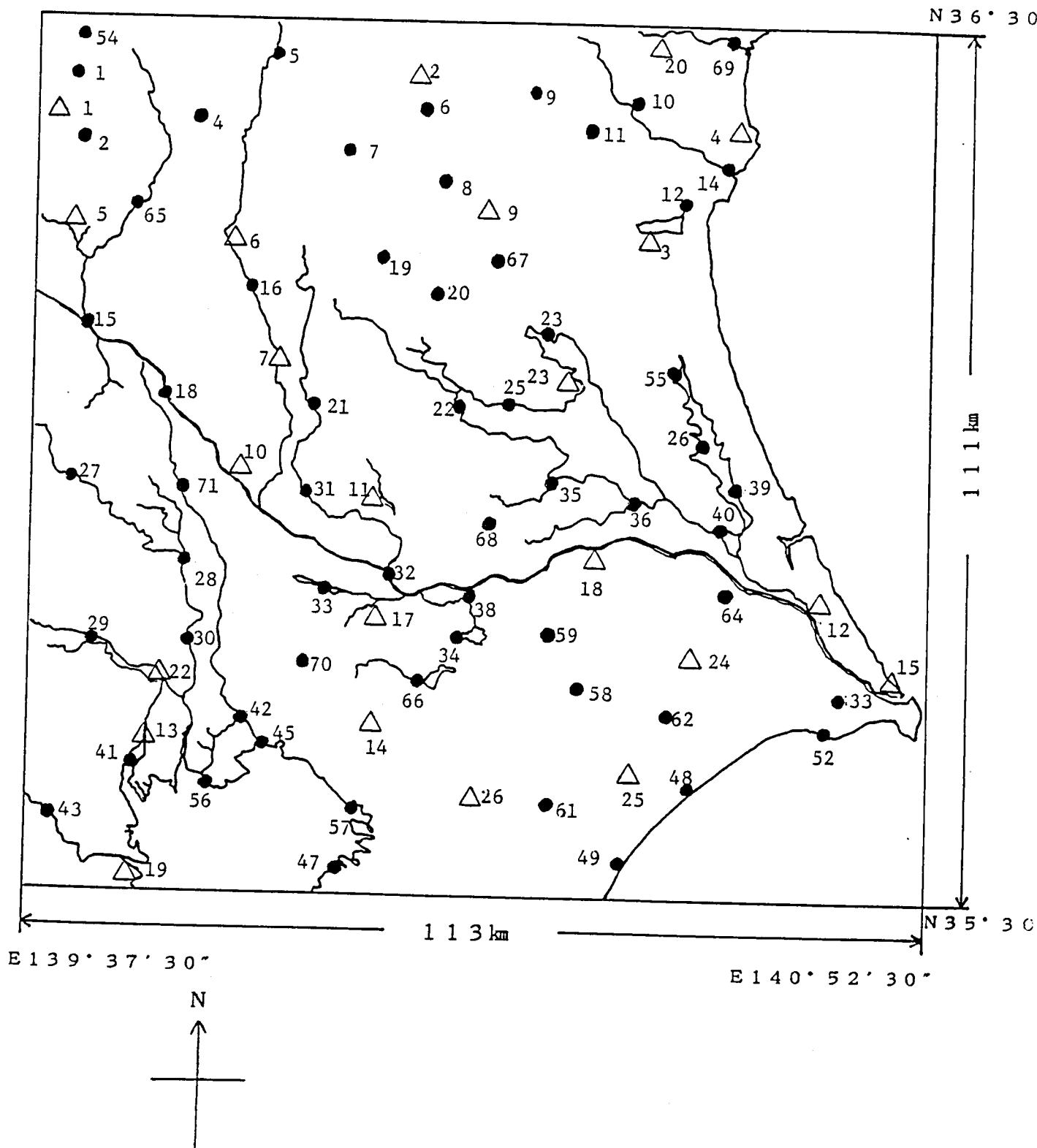


図2-3 対象領域の概略図と重ね合わせ用GCP (●印)
および評価用GCP (△印) の位置

の範囲の画像を探索画像から切り出す。これを探索画像のG C Pチップという。探索方法の説明図を図2-4に示す。基準画像のG C Pチップの中央 16×16 画素(図2-4のA)の画像データと探索画像のG C Pチップの左上隅の 16×16 画素(図2-4のB)の画像データとの相関を調べる。次に図2-4のBの位置を1画素ずつずらし探索画像のG C Pチップのすべての範囲の 16×16 画素の部分画像との相関を調べ最も相関の高い位置を探索する。相関の測度としては画像データ間の相関係数の値を使用した。探索の範囲は対応点の予測位置を中心として横および縦方向に8画素ずつずれた 17×17 画素の範囲(図2-4の斜線部分)である。画像T1とT2の重ね合わせ誤差のr m sは2画素程度なので最大ずれても6画素程度(0.3%以下の確率)であり、対応点は必ずこの探索範囲の中に含まれていると考えてよい。相関をとる部分画像の大きさを 16×16 画素にしたのは探索範囲が予測位置を中心として 17×17 画素の範囲で良いからであり、この事が相関をとる演算時間の短縮に大きく貢献している。相関領域の大きさは基本的には偶数でも奇数でも良く、相関処理をフーリエ変換を使って行う場合は 2^n の大きさが便利である。基準画像のG C Pチップの大きさは 16×16 で良いわけであるが将来探索範囲を2倍に拡張した場合に備えて 32×32 にしておいた。相関係数が0.5以上でマッチングが得られたG C Pのみを重ね合わせ用G C Pとして採用した。マッチング時の相関係数が0.2台から0.1毎に0.9台のレベルまでの各場合について目視により対応点を測定して自動探索の結果を評価してみた。埋立地の新造成、川の流れの変更など両方の画像間で明かに地形の変化があった場合相関係数が0.2から0.3台であった。0.4台以上では目視による相関結果と非常に良く一致したため相関係数が0.5以上であれば自動マッチングの結果は信頼できると考えて良い。Bennyもランドサット画像の基本幾何補正における基準G C Pの自動識別の研究²⁰⁾で同様の考え方を示している。相関係数がそれぞれ0.9から0.5台でマッチングが得られた基準画像のG C Pチップのバンド6の画像を図2-5に示す。

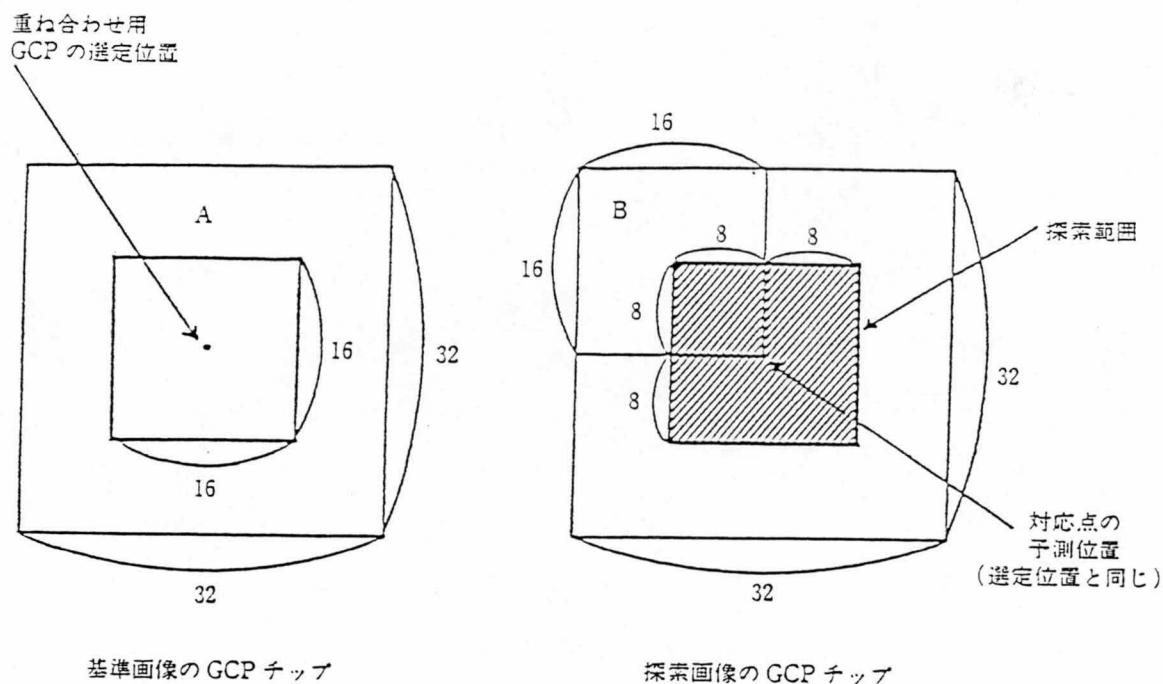


図 2-4 重ね合わせ用 GCP の対応点の探索

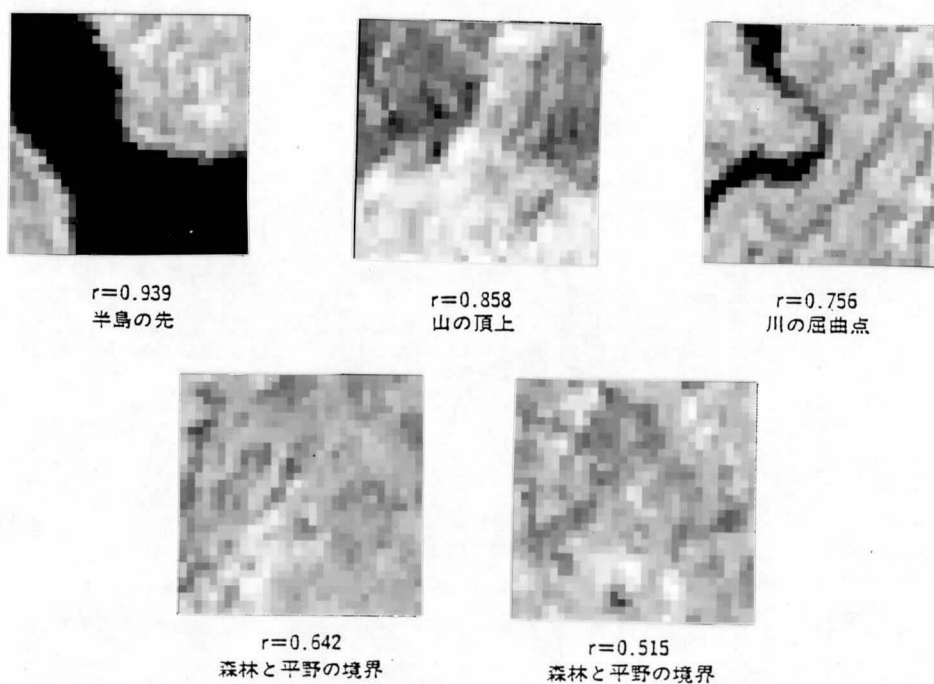


図 2-5 基準画像の GCP チップの画像例とマッチング時の
相関係数 (ランドサット MSS バンド 6)

(4) 重ね合わせ画像の作成

重ね合わせ用GCPの画像T1とそれに対する画像T2における座標を入力してそれらの誤差の自乗の和が最小になるような画像T2のリサンプリング式を求める。このリサンプリング式としては次の3次式を採用した。

$$\left. \begin{aligned} u &= a_1 x^3 + a_2 y^3 + a_3 x^2 y + a_4 x y^2 + a_5 x^2 + a_6 y^2 \\ &\quad + a_7 x y + a_8 x + a_9 y + a_{10} \\ v &= b_1 x^3 + b_2 y^3 + b_3 x^2 y + b_4 x y^2 + b_5 x^2 + b_6 y^2 \\ &\quad + b_7 x y + b_8 x + b_9 y + b_{10} \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

(2-4)式において(x、y)はリサンプリングして作成する新しい画像の座標であり、(u、v)は画像T2の座標である。

リサンプリング式の算出に当たっては1次から3次の式を作成してそれぞれの式を求め、得られた式について重ね合わせ用のGCPの対応点の座標を使って計算値と測定値のrms誤差を求めそれぞれの式を評価した。重ね合わせ用GCPとして60点使用した場合1次式で1.35画素、2次式で1.03画素、3次式0.77画素であり最も誤差の小さい3次式を採用した。もっと高次の式を使用すれば重ね合わせ用GCPにおけるrms誤差は小さくなるかもしれないが式を求めるために必要な最小限のGCPの数が多くなること、GCPの中間点や画像の端での誤差が大きくなることなどの欠点がある。(2-4)式の場合必要最小限のGCPの数は10個でありそれほど多くない。

(2-4)式の係数 $a_1 \sim a_{10}$ 、 $b_1 \sim b_{10}$ は重ね合わせ用GCPの画像T1とT2の対応点の座標をそれぞれ(x、y)および(u、v)に代入して観測方程式を作成し、観測方程式から導かれる誤差の自乗和を $a_1 \sim a_{10}$ および $b_1 \sim b_{10}$ で偏微分した式を0と置いて得られた連立方程式を解くことにより得られる。重ね合わせ用GCPとして60点使用した場合の式(2-4)の係数を表2-2に示す。2乗以上の項の係数($a_1 \sim a_7$ 、 $b_1 \sim b_7$)は非常に小さな値になっている。

表 2-2 重ね合わせ用 G C P を 60 点使用した時の
リサンプリング式 (2-4) の係数

a_1	0.3896291×10^{-9}	b_1	0.2159215×10^{-9}
a_2	$-0.1456597 \times 10^{-9}$	b_2	$-0.1870277 \times 10^{-9}$
a_3	0.1633754×10^{-9}	b_3	0.1233321×10^{-9}
a_4	0.1570387×10^{-9}	b_4	$-0.2697198 \times 10^{-9}$
a_5	0.1150946×10^{-4}	b_5	$-0.2307100 \times 10^{-5}$
a_6	0.6529790×10^{-5}	b_6	0.3858096×10^{-5}
a_7	$-0.8097835 \times 10^{-5}$	b_7	0.4927569×10^{-5}
a_8	0.1010288×10^1	b_8	$-0.5043437 \times 10^{-3}$
a_9	$-0.6942583 \times 10^{-2}$	b_9	0.9899258
a_{10}	0.1739220×10^1	b_{10}	0.5122544×10^1

(2-4) 式により画像 T2 をもう一度リサンプリングした画像 T2' を作成した。重ね合わせ用 G C P を 50 から 60 点選定することにより画像 T2' は画像 T1 に対して画素間のずれ (評価用 G C P の r m s 誤差) が 1 画素以下で重なっていた。

又画像 T2' と T1 との間で重ね合わせ用 G C P の誤差を測定して、同様の手順でさらにリサンプリングした画像を作成しても精度はほとんど変わらなかった。

2.2.4 重ね合わせ用 G C P の数と重ね合わせの精度

重ね合わせ用 G C P の数を 60 点から 10 点まで 10 点ずつ少なくして同様の手順で重ね合わせ画像を作成し、基準画像との重ね合わせの精度を評価してみた。精度の評価方法は選定した 23 点の評価用 G C P の対応点を重ね合わせ用 G C P の場合と同じく相関係数による自動マッチングで算出し、その誤差の

r m sで行うこととした。評価用G C Pとして高い相関係数でマッチングが得られる地形特徴のはっきりした点を選定したので、自動マッチングによる測定誤差は少ないと考えられる。相関係数は1画素毎に計算しているので自動マッチングそのものによる誤差は最大0.5画素であり1画素程度の重ね合わせ誤差より小さい。

誤差は画像のピクセル方向（横方向）とライン方向（縦方向）に画素単位で独立に計算される。その結果を表2-3に示し、ピクセル方向とライン方向の誤差の平均値をプロットしたものを図2-6に示す。G C Pの数が0というのは重ね合わせを行う前の画像T1とT2の誤差である。この図から次の事が言える。

（1）G C Pの数が20点以上になれば誤差が1.1画素程度になりG C Pを増加させても精度はそれ程良くならない。

表2-3 重ね合わせ用G C Pの数と重ね合わせの誤差

重ね合わせ用 G C Pの数	評価用G C Pの 誤差のr m s（画素）		ピクセル方向 とライン方向 の平均値
	ピクセル方向	ライン方向	
0	1.945	1.642	1.794
10	1.302	1.978	1.64
20	1.103	1.083	1.093
30	1.161	1.000	1.081
40	1.216	1.000	1.108
50	1.103	0.860	0.982
60	1.000	0.860	0.93

2.2.5 ランドサットM S S画像のバンドと相関処理

G C Pチップの画像データ間の相関処理はランドサットM S S画像の各バンド毎に独立で処理できる。重ね合わせ用G C P60点を使って重ね合わせを行

った2つの画像間において、それぞれの画像のバンド4、5、6、7のデータを使って各GCPの対応点の探索処理を行ってみた。各バンドのデータを使った場合の重ね合わせ用GCP60点及び評価用GCP23点の合計83点の相関係数の最高値の平均値および対応点の2つの画像間の誤差のrmsのピクセル方向とライン方向の平均値を求めてみた結果を表2-4に示す。相関係数および誤差の両方のデータから自動マッチングにはバンド6あるいは7を使用するのが最も良く、バンド5、4の順であることを示している。バンド6あるいは7が自動マッチングに適している理由はそれらのバンドの画像は陸域と海域の境界が明瞭であり、一方GCPとして川の合流点や埋立地の角等陸と水の境界点が選別されることが多いためである。バンド6と7ではバンド6が少し良いことを示しているので、対象領域の画像の重ね合わせの自動マッチングにはバンド6を使用した。

表2-4 ランドサットMSS画像の各バンドを
使用した場合の相関処理の比較

項 目	ランドサットMSS画像のバンド			
	4	5	6	7
相関係数	0.629	0.730	0.796	0.784
誤差のrms	1.763	1.271	0.807	0.897

2.2.6 GCPの地形特徴と相関係数

選定した重ね合わせ用GCP60点と評価用GCP23点について埋立地の角や川の合流点など地形特徴によっていくつかのグループに分け、グループ毎のバンド6のマッチング時の相関係数を求めてみた。その結果を表2-5に示す。やはり半島の先や埋立地の角等画像のコントラストがはっきりしている陸と水の境界点の相関係数が最も高く森林と平野の境界が最も低くなっている。

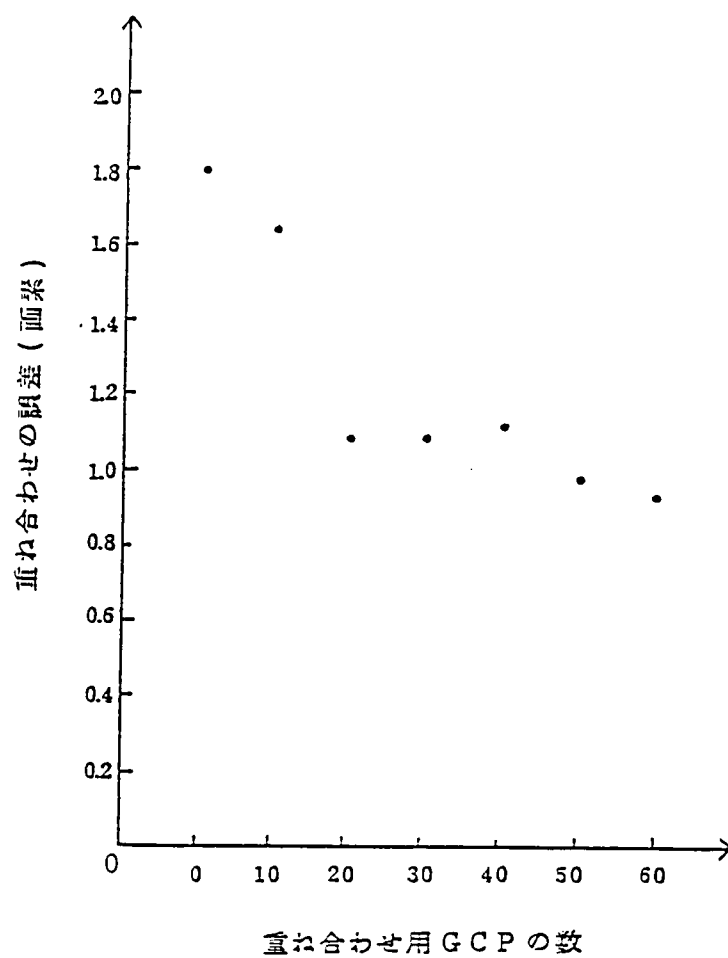


図 2-6 重ね合わせ用 G C P の数と重ね合わせの誤差
(評価用 G C P の誤差の rms のピクセルとラ
イン方向の平均値)

相関係数の高い順に自動マッチングによる対応点の探索精度も良いと考えられる。又人間の目で見ても難しそうに見えるパターンでも相関係数0.7程度でマッチングがとれていた。

表 2-5 G C P の地形特徴と相関係数

G C P の地形特徴	個数	相関係数の平均値
半島の先	14	0.906
埋立地の角	8	0.905
山の頂上や尾根	8	0.871
川の河口	5	0.856
川の合流点	10	0.810
川の屈曲点	18	0.743
小さな池の端や真ん中	7	0.720
森林と平野の境界	13	0.674

2.2.7 G C P チップ間の相関についての考察

2つのG C P チップ間の相関の測度としてここでは相関係数を採用したが、他にもそれぞれの画像の濃度レベルの差の絶対値の和（差の絶対値法）あるいは差の自乗の和（差の自乗法）などが考えられる。相関係数法においては相互のG C P チップの画像の平均濃度レベルに差がある場合とない場合とでは測度として計算される相関係数の値は原理的には変わらないが、差の絶対値法や自乗法では計算される測度の値はそれぞれの場合で変わって来る。ここではマッチングの相関係数が0.5以上の点のみを重ね合わせ用G C Pとして採用することにしたが、このように相関係数法においては相関の測度の閾値を相関の対象となる2つの画像の平均濃度レベルの差を考慮することなく設定することが出

来る利点がある。1次幾何補正画像T1とT2を対象として重ね合わせ用GCP60点について上に述べた3種類の相関法でそれぞれ相関処理を行い、対応点の誤差のrmsのピクセルとライン方向の平均値と1点あたりの演算時間を調べてみた。その結果を表2-6に示す。対応点の誤差のrmsはほとんど変わらないのでマッチングの精度は3者の方法でほとんどが変わらないと見られる。演算時間（演算速度1MIPSの計算機による測定値）は相関係数法が最も長いが他の2つの方法も少し短いだけである。前述の利点を考慮すると相関係数法が最も良いと考えられる。

表2-6 各相関法による相関処理の比較

相関法	対応点の誤差のrms のピクセルとライン 方向の平均値（画素）	演算時間 秒／点
相関係数法	1.955	4.3
差の絶対値法	1.981	3.7
差の自乗法	1.968	4.1

2.3 要約

本章を要約すれば以下の通りである。

(1) 衛星データは衛星の軌道・姿勢の変動、センサーの内部誤差、地球の自転による地球表面の移動などに起因する幾何学歪を持っており、地上局でこれらの歪を補正する幾何補正（基本幾何補正）を行っている。

(2) 基本幾何補正の方法としては多項式モデルによる方法と幾何モデルによる方法とがあり、殆どの地上局では後者の方法を使用している。幾何モデルによる方法には、歪をモデル式により補正するシステム補正と、GCPにより誤差

を修正したモデル式を使用する精密補正がある。

(3) 基本幾何補正されたデータはランドサットMSSの場合、精密補正で1～2画素(1画素 57×57 m)、システム補正で約20画素の誤差があり、同一地域を異なった時期に観測したデータはそのままでは精度良く重ならない。

(4) 基本幾何補正された画像は縦方向が衛星の進行方向、横方向が走査方向になっていて上が真北方向になった地形図にそのまま重なるようになっていない。地形図に重なるように補正(地理補正という)することにより画像利用の有効性が非常に増大する。

(5) 2段階処理方式により、システム補正データから高精度に重なった2つの地理補正画像を迅速に作成できることを示した。先ず比較的小数の基準GCPを使って同一の地理補正座標上でリサンプリングして粗い重ね合わせを行い、次に多数の重ね合わせ用GCPを使って精密な重ね合わせを行う方法である。リサンプリング式としては第1段階ではアフィン変換式、第2段階では3次式で良い事を示した。

2段階処理後の重ね合わせ画像についてさらに重ね合わせ処理を行っても精度は改善されなかった。

(6) 多数の重ね合わせ用GCPの2つの画像間の対応点を、重ね合わせ用GCPのまわりの小領域の画像データ間の相関係数を調べる事により、自動的に探索することが出来る事を示した。これによりこれまでの衛星データの重ね合わせ処理を非常に迅速に行うことが出来るようになった。

第1段階の粗い重ね合わせにより拡大、回転などの歪を除いておき、これにより第2段階のGCPの自動探索の成功率を高めることが出来る。これが2段階処理方式の利点である。

(7) 大きさが約110 km四方の画像の重ね合わせにおいて、重ね合わせ用GCP

Pの数を10点から60点まで10点ずつ増加させて重ね合わせ画像を作成し、重ね合わせ用GCPとは別に選定した評価点(23点)での精度を調べた。GCPを20点以上選定すれば誤差が1画素程度になり、GCPをそれ以上増加させても精度はそれほど良くなることを示した。誤差が1画素程度であるのは、重ね合わせ用GCPや評価用GCPの座標を、探索時間を早くするため1画素単位の精度で求めたためである。1画素以下の精度で求めれば誤差はもっと小さくなると考えられる。

(8) 重ね合わせ用GCPの対応点の自動探索において、相関処理とランドサットMSSのバンドとの関係について調査し、バンド6が最適であることを示した。又、重ね合わせ用GCPの地形特徴と対応点探索時の相関係数の値について調査した。バンド6の場合、半島の先や埋立地の角など陸と海との境界点の相関係数が高く、次に山の頂上、川の合流点や屈曲点、森林と平野の境界の順であった。

(9) 重ね合わせ用GCPのまわりの小領域の画像データ間の相関処理において、相関係数法、差の絶対値法及び差の自乗法について得失を調べ、相関係数法が最も有利であることを示した。

第3章 重ね合わせデータの土地被覆分類への応用

3.1 序

衛星データの重ね合わせ技術を土地被覆分類に応用した場合の分類精度の向上率について調査した。地表面を観測したマルチスペクトルデータを使って、後述するマルチスペクトル分類により、地上分解能単位で地表面の状況を幾つかの土地被覆カテゴリーに分けて識別することができる。衛星データの特徴である繰り返し観測性を利用して、異なった時期に観測されたデータをマルチスペクトル分類に使用することにより、分類精度が向上することが期待される。

これまでに複数時期のランドサットデータを土地被覆判別、農作物判別、森林の林相分類等に応用した研究が多くなされている^{27)~30)}。Carlsonらは作物の成長期に応じて時期の異なるデータが作物の面積推定に有効であることを写真判読により示した²⁷⁾。Bizzellらは複数時期データの使用が農作物の判別に有効であることを示し、単一時期データの場合に比べて判別精度が81%~89%になったとしている²⁸⁾。田中らは複数時期の重ね合わせデータが稲作地判別、植生の判別に有効であることを示した²⁹⁾。著者らは田植時期と収穫期のデータ使用することにより稲作地と畑の識別に有効であるとし^{31)、32)}、また夏と冬のデータを使用することにより広葉樹と針葉樹の判別精度が向上するとしている^{32)、33)}。Bauerらは複数時期と単一時期のデータを使ってとうもろこしと大豆の作付け面積の調査を行い、複数時期のデータを使用した場合必ずしも精度が良くなかったが、複数時期の情報を有効に利用する解析方法の研究が必要だとしている³³⁾。

文献^{30)、34)、35)、37)}は複数時期のデータを使用する場合のデータ圧縮に関する研究である。村井らは平均と標準偏差により正規化した後、各バンドの和の軸と可視域と近赤外域の差の軸の2軸に圧縮し、土地被覆の変化の検出に応用している³⁰⁾。Badhwarらは各バンドの線形結合によりBrightnessとGreennessを表す2軸³⁷⁾に圧縮し、とうもろこしと大豆の分類を行い、分類精度は80~90%であったとしている³⁴⁾。またAbottenは主成分分析法³⁵⁾により圧縮・変換したデータを用いて農作物の分類を行った³⁵⁾。

以上に見るようにこれまでの研究は複数時期データの農作物の分類への有効性と分類精度を調査したものが多い。

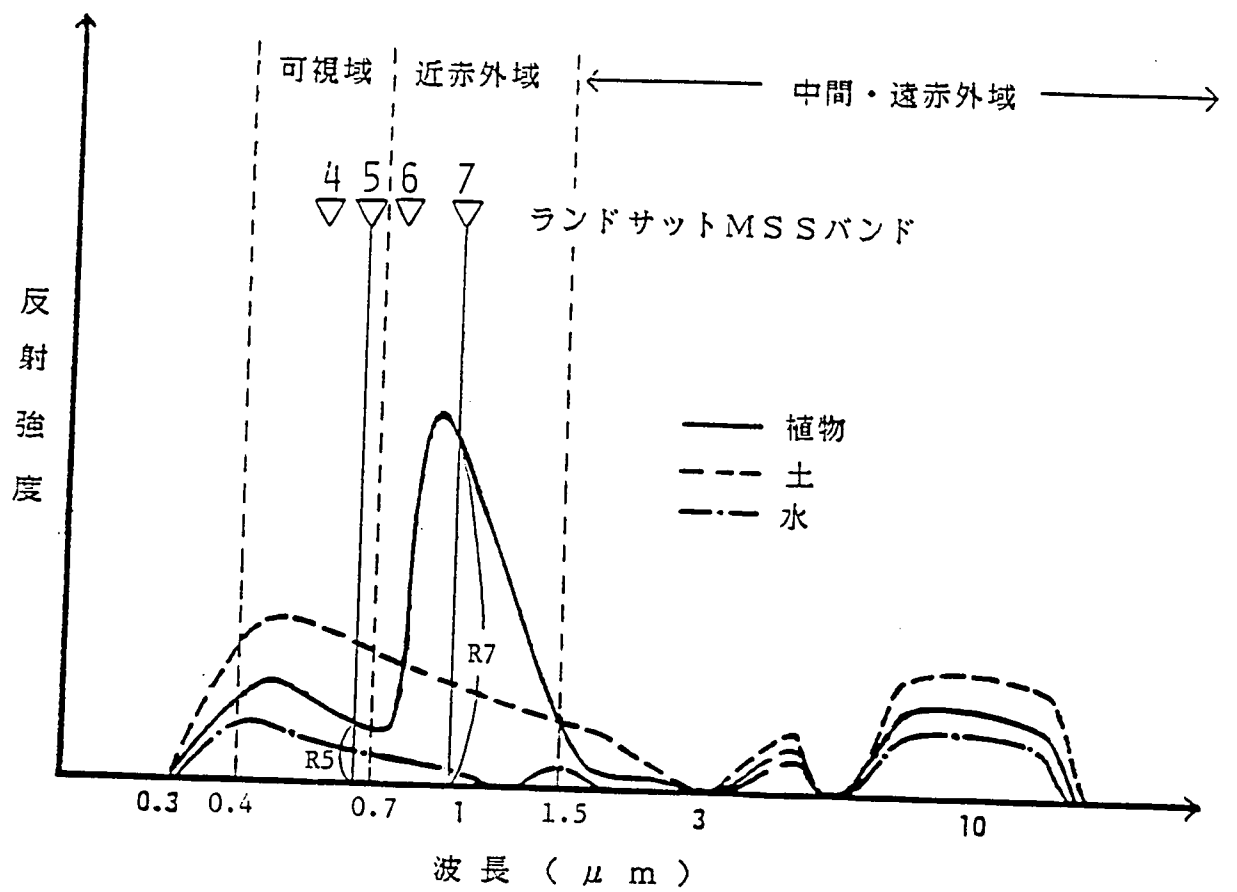
本研究は、土地被覆一般について複数時期の重ね合わせデータを使用した場合の分類精度の向上率を調べたものである。また同季節のデータおよび異季節のデータを重ね合わせた場合について調査し、同季節のデータを使用しても分類精度が向上することを示した。

本章では3.2、3.3で分光反射特性の原理とマルチスペクトル分類の手順の概要を説明し、3.4で重ね合わせデータを使用した場合の分類精度の向上率についての研究結果を述べる。

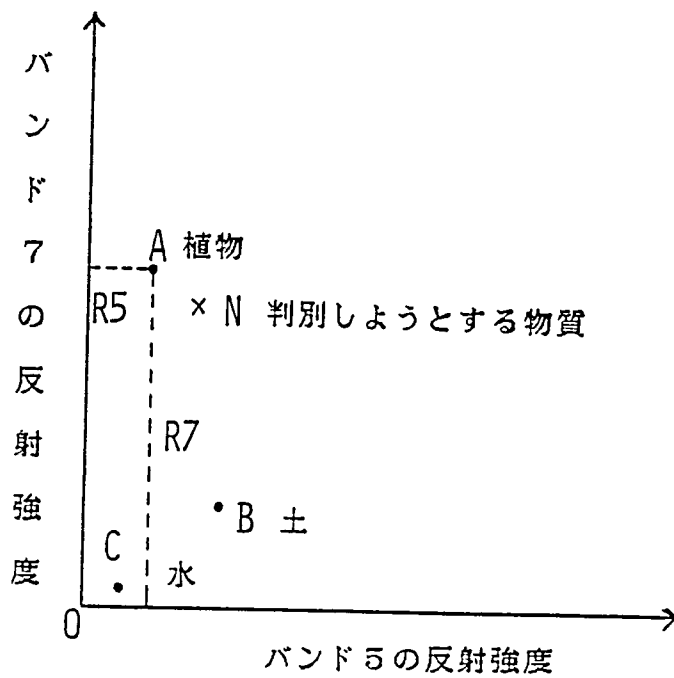
3.2 分光反射特性の違いによる物質の判別

物質はそれぞれ固有の分光反射特性を持っていることを利用して物質を判別することが出来る。分光反射特性の違いによる物質の判別の説明図を図3-1に示す。自然界の代表的物質である植物、土、水の分光反射特性を図3-1(a)に示す。厳密には $3\mu\text{m}$ 付近より短い波長域では太陽光を光源とした反射特性を示し、それより長い波長域では物質の温度によって定まる放射特性を示している。

ランドサットMSSのバンド4、5、6、7の観測波長の位置を▽印で示す。ここでバンド5と7の反射強度を座標軸とした図3-1(b)のような二次元空間（特徴空間という）を考え、植物、土、水の各バンドの反射強度をこの特徴空間にプロットすると同図のA、B、Cになる。例えば植物のバンド5と7に対する反射強度を R_5 と R_7 とすると、図3-1(b)の座標で横軸方向に R_5 、縦軸方向に R_7 の位置に点Aが来る。原点から点A、B、Cへのベクトルを植物、土、水の特徴ベクトルという。物質によって固有の分光反射特性を持つという事は、同様の性質を持つ物質は特徴空間において同一の点ないしはその近傍に分布するという事である。判別しようとする物質のバンド5と7の反射強度が得られた場合、その値を特徴空間にプロットし、その点がどの位置に来るかにによって物質の判別を行う。例えば、図3-1(b)の点Nに来た場合、Nと点A、B、Cとのそれぞれの距離を比較してみると、点Aとの距離が最も小さ



(a) 物質の分光反射特性 (文献¹⁾、PP.796)



(b) 特徴空間における物質の判別

図3-1 分光反射特性の違いによる物質の判別

いので、この物質は植物に近い性質を持っていると判別することが出来る。この場合、二次元であったが n 個のバンドの観測データを使えば n 次元の特徴空間で判別することが出来る。

3.3 マルチスペクトルデータによる土地被覆分類

マルチスペクトルデータによる土地被覆分類の手順を図3-2に示す。先ず市街地、住宅地、畑など分類しようとする土地被覆分類のカテゴリーを設定する。次に設定した分類カテゴリーを代表する領域（トレーニング領域という）を選定する。トレーニング領域の選定は入力マルチスペクトルデータを画像表示装置に表示しながら航空写真、土地利用図、現地調査結果などの情報を参照しながら行う。各カテゴリー毎に選定されたトレーニング領域内のデータを

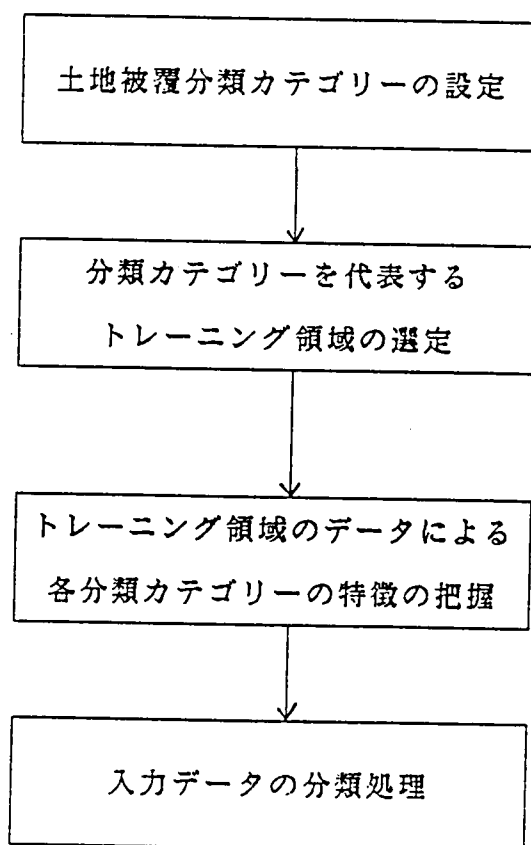


図3-2 マルチスペクトルデータによる土地被覆分類の手順

使って各カテゴリーの特徴空間での分布を把握する。分布の把握方法は後に行う分類処理の方法と密接に関連しており、代表的分類方法である最尤法分類を行う場合、各カテゴリーの分布をトレーニング領域のデータの平均値と分散・共分散によって決定される多次元正規分布関数で把握する。これは各カテゴリーの分布が特徴空間で正規分布をすると仮定するわけである。カテゴリー j の多次元正規分布関数は次式で与えられる（文献¹¹、PP.800）。

$$P_j(x) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma_j|^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} (x - \mu_j)^T \Sigma_j^{-1} (x - \mu_j) \right] \quad (3-1)$$

d : 次元数すなわち観測バンドの数

μ_j : カテゴリー j のトレーニング領域のデータの平均値のベクトル

x : 未知画素の観測値のベクトル

Σ_j : カテゴリー j のトレーニング領域のデータの分散・共分散マトリクス

最後に入力データの各画素の観測値を x に代入して、その画素に対する各カテゴリーの多次元正規分布関数の値（確率密度という）を求め、最も確率密度の大きいカテゴリーにその画素を分類する。通常ある閾値を設けておき最大の確率密度がその閾値より小さい場合どのカテゴリーにも属しないと分類する。

3.4 重ね合わせデータによる土地被覆分類精度の向上率の調査

3.4.1 土地被覆分類精度の調査方法

次の方法により1時期のデータおよび2時期の重ね合わせデータを使用した場合の分類精度を調べた。

(1) 同季節のデータ2つ、異季節のデータ1つの3つのデータを使って、同季節及び異季節の重ね合わせデータを1つずつ作成する。

(2) 土地被覆分類カテゴリーを設定し、それぞれのカテゴリーに対するトレ

ーニング領域を選定する。このトレーニング領域は使用した3つのデータを通じて土地被覆が変化していない部分で選定する。

(3) 1 時期のデータおよび2 時期の重ね合わせデータを使ってトレーニング領域のデータを分類し、各トレーニング領域の選定されたカテゴリーへの分類比率により土地被覆分類精度を調べる。

3.4.2 使用データと重ね合わせ画像の作成

次の3つのランドサットMSSデータを使用した。

バスーロウ（シーン名）	観測日	備考
115-35（東京）	1972年1月26日	ランドサット1号
115-35（東京）	1980年11月11日	ランドサット2号
107-35（関東）	1983年5月18日	ランドサット4号

それぞれ関東地方を観測したデータである。ランドサット1～3号とランドサット4号とは観測シーンのバスーロウの番号が異なる。図2-3に示す約110km四方の領域をテストサイトとして2.2項で述べた2段階リサンプリング法による重ね合わせを行い、上の3つのランドサットデータの重ね合わせ画像を作成した。約60点の重ね合わせ用GCPを使用し、それぞれの画像は1画素以下のずれで重なっていた。

2 時期の重ね合わせデータとしては、1972年と1983年のそれぞれバンド5と7を抜き出して重ね合わせたデータ、および1972年と1980年のそれぞれバンド5と7を抜き出して重ね合わせたデータを作成した。ランドサットMSSのバンド4と5は可視域で、6と7は近赤外域であり互いに相関性が高い。比較的相関性の低い可視域と近赤外域のバンドからそれぞれ1つつ抜き出すことにした。結局次の5種類のデータを使って土地被覆分類精度を調べた。

DT72	1972年11月26日	バンド4、5、6、7	1 時期
DT80	1980年11月11日	バンド4、5、6、7	
DT83	1983年5月18日	バンド4、5、6、7	
DT7283	1972年と1983年のそれぞれバンド5と7		2 時期
DT7280	1972年と1980年のそれぞれバンド5と7		

DT7283は異季節（11月と5月）の、DT7280は同季節（11月同志）の重ね合わせデータである。

3.4.3 土地被覆分類カテゴリーの設定とトレーニング領域の選定

表3-1に示すような15項目の土地被覆カテゴリーを設定し、テストサイトの地形図、植生図を参照しながらそれぞれのカテゴリーを代表するトレーニング領域を選定した。土地被覆カテゴリーは市街地系、農地系、草地系、森林系、水系に大別される。テストサイトが約110km四方と相当大きいので、トレーニング領域は各カテゴリー毎に複数個テストサイトのあちこちに分布するように選定した。又トレーニング領域はそれぞれの時期の画像を見ながら、それぞれの観測時期の間で変化が起こっていないような所を選定した。選定したトレーニング領域の位置を共通にして、上で作成した5種類のデータからそれぞれトレーニングデータを作成した。DT7283、DT72およびDT83のトレーニングデータの各バンドの平均値を土地被覆カテゴリーの各系毎に図3-3～3-7に示す。

表 3-1 土地被覆分類で設定したカテゴリー

(画素数はトレーニングデータの画素数)

系	番号	土地被覆 カテゴリー	備 考 (トレーニング領域等)	画素 数
市 街 地 系	1	市 街 地	東京都心部、地方都市中心部	739
	2	住 宅 地	市街地の周辺部	840
	3	造 成 地	工業団地・住宅地等のための造成地、 一部既に建設済み	504
	4	大きな建物	成田空港ビル、百里基地ビル	154
農 地 系	5	水 田		6651
	6	畑	野菜、ピーナッツ等の畑	424
	7	桑 畑		251
草 地 系	8	ゴ ル フ 場		672
	9	草 地 1	遊水地に生成した草地	352
	10	草 地 2	河川沿いの草地	152
森 林 系	11	広 葉 樹	クヌギ、コナラ	793
	12	杉・桧		547
	13	松	アカマツ、クロマツ	599
水 系	14	河・湖・沿岸水	霞ヶ浦、手賀沼、沿岸水	7666
	15	海 水	東京湾、鹿島灘	15667

3.4.4 重ね合わせデータによる土地被覆分類精度の向上率

通常図 3-2 の手順において、トレーニング領域のデータにより各カテゴリーの特徴を把握した後、入力データの分類を行う前に、先ずトレーニング領域のデータの分類を行い、それらのデータの各カテゴリーへの分類比率を調べる。分類比率の結果は土地被覆カテゴリーの項目を要素とした分類マトリクスで表

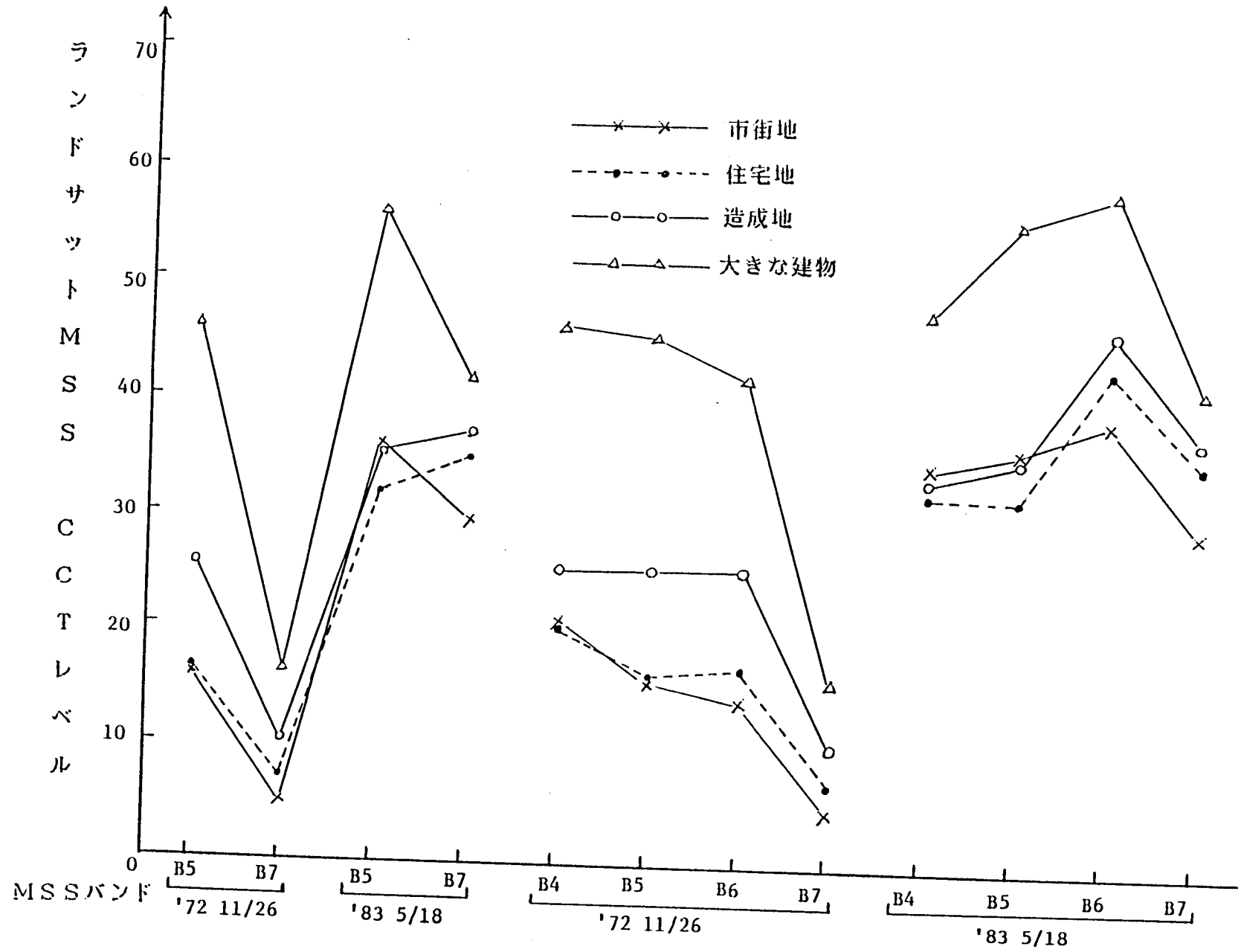


図3-3 市街地系のカテゴリーのトレーニングデータの各バンドの平均値

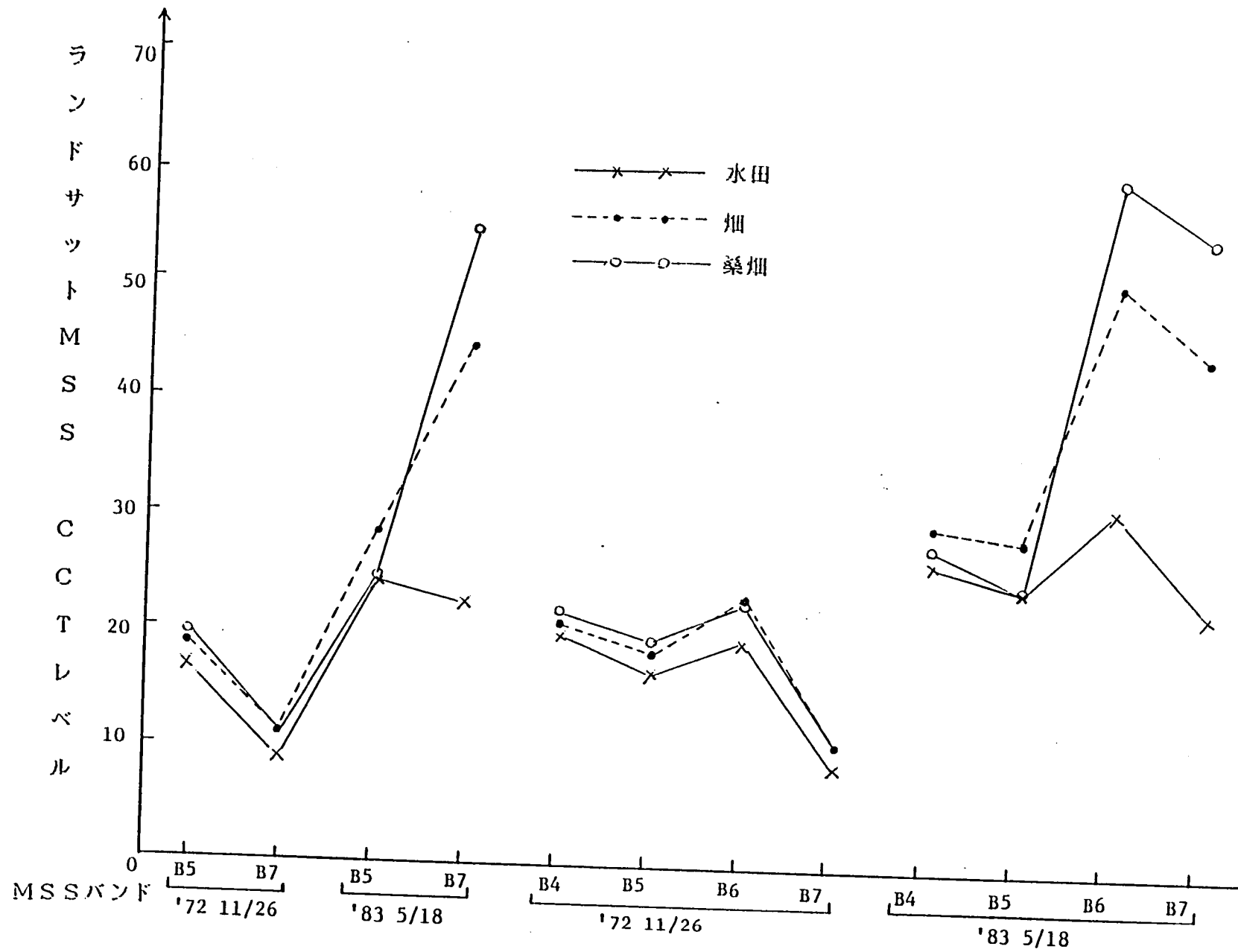


図3-4 農地系のカテゴリーのトレーニングデータの各バンドの平均値

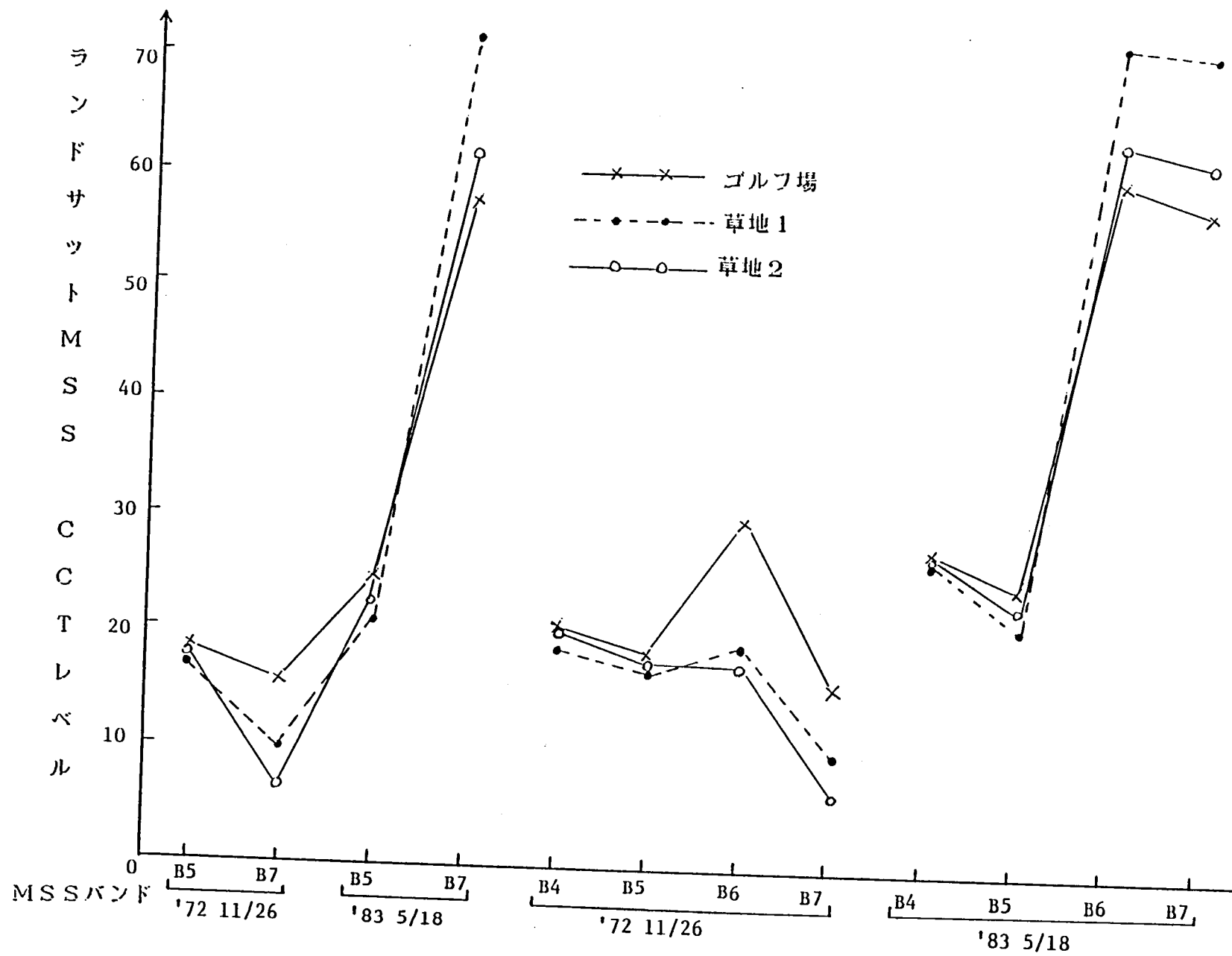


図3-5 草地系のカテゴリーのトレーニングデータの各バンドの平均値

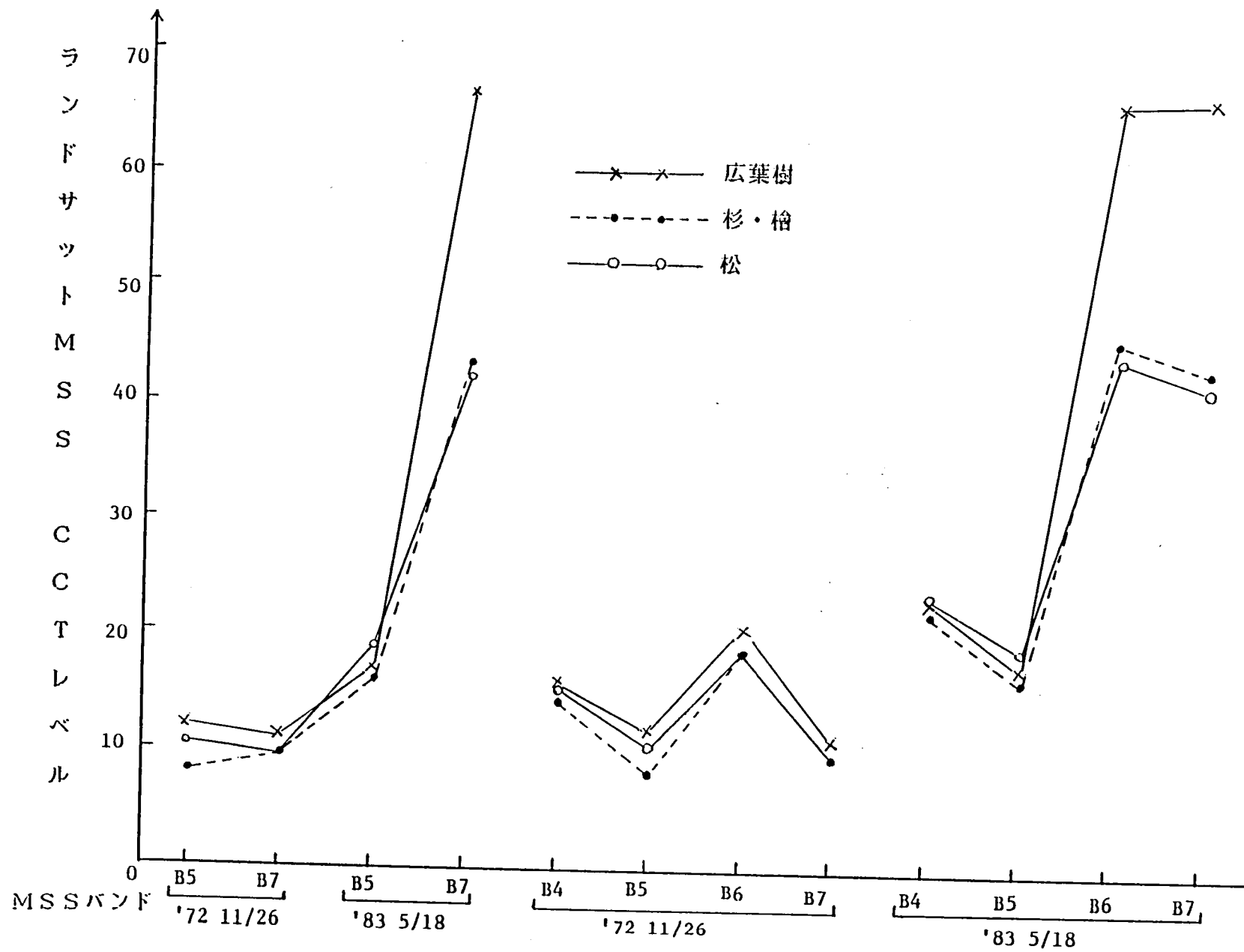


図3-6 森林系のカテゴリーのトレーニングデータの各バンドの平均値

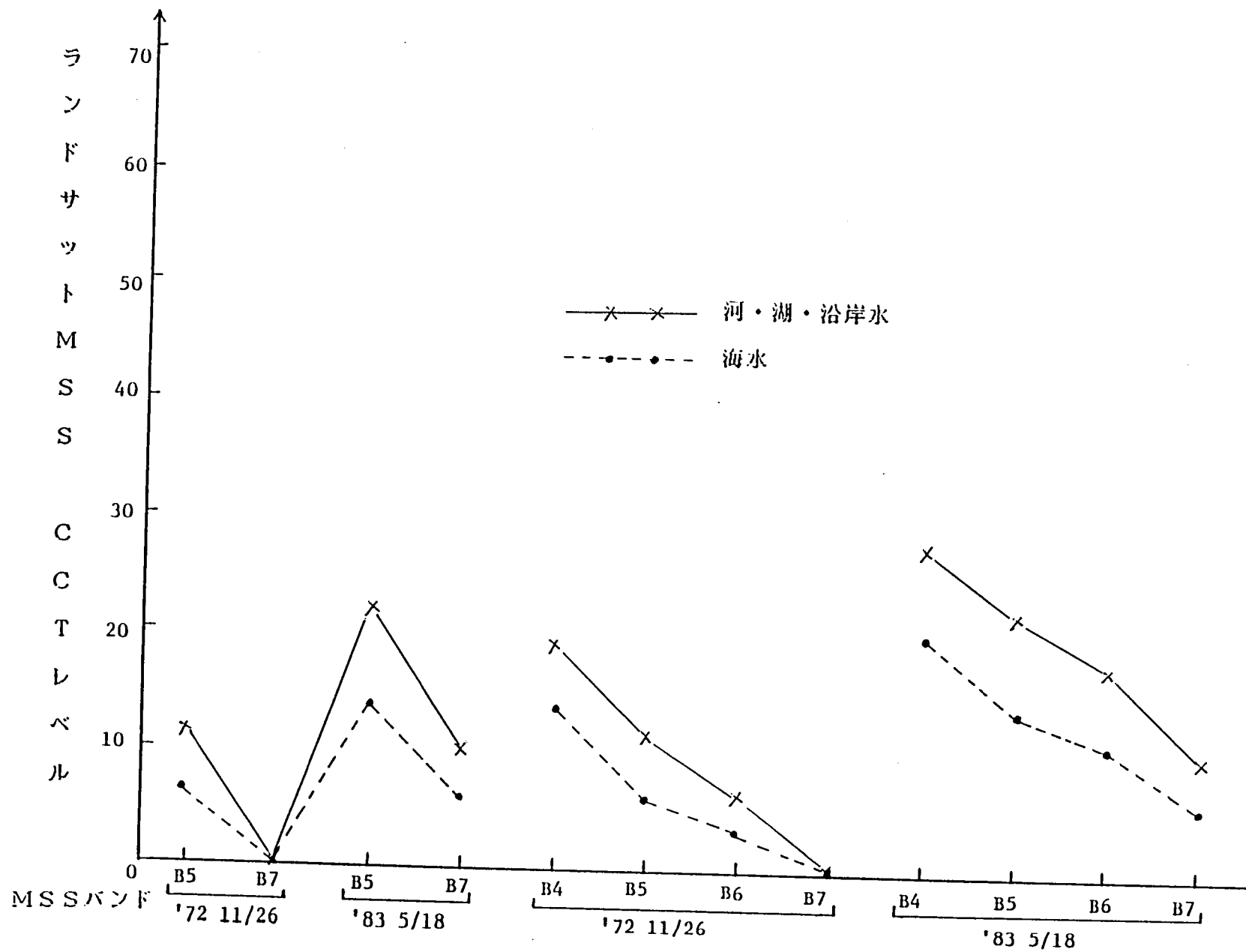


図3-7 水系のカテゴリのトレーニングデータの各バンドの平均値

現される。この分類マトリクスはトレーニングデータの該当カテゴリーの代表性を示すものであり、或るカテゴリーに選定されたトレーニングデータがそのカテゴリーを良く代表していれば、そのデータは殆どそのカテゴリーにのみ分類され他のカテゴリーには分類されない。分類マトリクスの対角線要素の値はトレーニングデータの選定されたカテゴリーへの分類比率を示しており、この値はトレーニング領域の選定が正しいと考えれば分類精度を示す指標であると考えることが出来る。

5種類の各データを使用した場合の分類マトリクスを表3-2～3-6に示す。対角線要素の値を太線で囲んである。表3-2の分類マトリクスの第1行目の数値は、市街地に選定されたトレーニングデータの中、88%が市街地に、7%が住宅地に、6%が草地2に分類されたことを示している。表3-2～3-6の対角線要素の値を抜き出して整理したものを表3-7に示す。表3-2～3-7および図3-3～3-7を見ながら、土地被覆分類に2時期の重ね合わせデータを使用した場合の効果について検討すると次のようなことが言える。

(1) 表3-7において、全カテゴリーの平均値はDT72とDT83単独ではそれぞれ73%と78%であるが、DT7283では91%と大きくなっている。又DT72とDT80単独ではそれぞれ73%、68%であるがDT7280では81%になっている。また各カテゴリー別に見ても殆どの場合2時期のデータを使用した場合の方が大きくなっている。重ね合わせデータを使用することにより分類精度は、異季節の場合75%（73%と78%の平均）から約15%、同季節の場合70%（68%と73%の平均）から約10%向上している。

(2) 重ね合わせデータ使用による分類精度向上の要因として次の2つが考えられる。

(i) それぞれの時期のデータから相関の低いバンドを抜き出して使用することが出来る。

(ii) それぞれの時期により分光反射特性が変化したデータを使用することが

出来る。

同季節の重ね合わせデータの場合でも分類精度が向上しているのは(i)の要因によるものと考えられる。また異季節の場合の向上率15%の中10%は(i)の要因によるものと考えれば、(i)の要因の方が(ii)の要因より分類精度向上の寄与率が大きいと考えられる。

(3) 1時期単独のデータではDT83の分類精度が最も良く、5月と11月のデータでは5月のデータの方が土地被覆分類に適している。これは5月の方が日射強度が強くなるため観測値のダイナミックレンジが広くなること、および植生の活性度が高くなることなどにより土地被覆の様相が変化に富むこと等の理由が考えられる。各カテゴリーのトレーニングデータの平均値の特徴を示す図3-3～3-7において、5月のデータの方がダイナミックレンジが広がっているのが分かる。DT7283の分類精度が良いのは5月のデータがかなり寄与しているものと考えられる。

(4) 土地被覆カテゴリーの各系毎の分類精度を計算してみた。その結果を表3-7に示す。2時期のデータを使用することによる分類精度の改善度の順位は農地系、草地系、市街地系、森林系、水系の順になっており、これは時期により分光反射特性の変化の大きいと考えられる順序になっている。

農地は時期により農作物が植えられていたりいなかったりし、水田はその典型である。草地も又時期によりその活性が大きく変化する特性を示す。

市街地系のなかの住宅地と造成地は部分的に植生を含んでおり、時期により比較的大きな分光反射特性の違いを示す(図3-3)。従って2時期のデータを使用した分類精度は、市街地はそれほど変わらないが、住宅地と造成地はかなり改善される。

森林はもちろん時期によって異なった分光反射特性を示す(図3-6)。しかし森林系のカテゴリーの分光反射特性は他の土地被覆カテゴリーの系の分光反射特性と比較的異なっているため、分類において森林系のカテゴリー間内での誤分類は見られるが、他の土地被覆カテゴリーの系への誤分類は少ない(表

3-2)。従って2時期のデータを使用することにより森林系のカテゴリー間での分類精度の向上には役立っているが、他の土地被覆カテゴリーの系との分類にはそれほど役立たない。これが森林系の順位が低い理由であると考えられる。

水の反射特性は他のカテゴリーとは非常に異なっており、1時期のデータだけでも非常に分類精度が良く2時期のデータ使用する必要はない。むしろ水の状況は時間により変動が激しく重ね合わせデータを使用した分類は誤った結果をもたらす。

表3-2 DT72を使用した場合のトレーニングデータの分類マトリクス (%)

番号	カテゴリー	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	市街地	88	7								6					
2	住宅地	10	69	1		9		3		1	6					
3	造成地	1	1	76	4			14		1	3					
4	大きな建物	1		10	86			1			2					
5	水田	4	11	2		34	11	25	1							
6	畑			9		7	26	27	9	9	2	1		10		
7	桑畑		2	4		4	6	77		6						
8	ゴルフ場					1	6		81	1		7		5		
9	草地 1		1	1		3	2	4		90						
10	草地 2	24		5		1	18	11	1		39				1	
11	広葉樹					1	1		1	1		76	8	13		
12	杉・桧											5	91	4		
13	松					1	3			2		10	20	63		
14	月・湖・沼・池・水田										1				98	1
15	海水											2				97

表3-3 DT80を使用した場合のトレーニングデータの分類マトリクス (%)

番号	カテゴリー	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	市街地	81	10	2							6					6
2	住宅地	10	73	6		9	2	1								
3	造成地	3	7	59	2	20	3	5		1						
4	大きな建物			3	97											
5	水田	1	19	12		52	3	12		1	2					
6	畑		5	4		13	43	10	8	13	2			2		
7	桑畑			4		19	4	45	4	20	5					
8	ゴルフ場						8	2	79	2	6	2		2		
9	草地 1					1	1	11		86	1					
10	草地 2		1	5		22	5	19	13	17	18					
11	広葉樹						1		1			79	9	10		
12	杉・桧											6	85	9		
13	松								1			8	15	77		
14	月・湖・沼・水	1													88	12
15	海水	1													36	60

表3-4 DT83を使用した場合のトレーニングデータの分類マトリクス (%)

番号	カテゴリー	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	市街地	85	10	4												
2	住宅地	9	76	9		1	5									
3	造成地	8	29	40	5	3	14				1					
4	大きな建物	1		4	96											
5	水田	1	4	1		92	1							1		
6	畑		9	5			70	5	4		4			2		
7	桑畑						5	66	18	2	9					
8	ゴルフ場						3	18	59	1	16			4		
9	草地 1							1	1	87	10	2				
10	草地 2						5	10	9	34	43					
11	広葉樹								1	3		95	1	1		
12	杉・桧											1	89	10		
13	松						2		3		1	2	23	69		
14	月・湖・沼・森林														100	
15	海水															100

表3-5 DT7283を使用した場合のトレーニングデータの分類マトリクス (%)

番号	カテゴリー	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	市街地	91	8	1							6					
2	住宅地	9	84	3			3									
3	造成地	1	3	88	3	1	3	1								
4	大きな建物	1		4	96											
5	水田		2	1		95	3									
6	畑		5	3		1	80	6	4		1			1		
7	桑畑					1	6	87	1	3	2					
8	ゴルフ場						4	1	92	1				2		
9	草地 1							2	1	94	3					
10	草地 2							1		5	95					
11	広葉樹								1	1		95	1	1		
12	杉・桧												93	6		
13	松						3		1			2	15	79		
14	月・湖・沼・森林														100	
15	海水					1									1	98

表3-6 DT7280を使用した場合のトレーニングデータの分類マトリクス (%)

番号	カテゴリー	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	市 街 地	89	9	1												
2	住 宅 地	8	81	3		5	1			1	1					
3	造 成 地		2	87	2	2		6								
4	大きな建物			5	95											
5	水 田	1	18	6		56	3	12		1	3					
6	畑		5	2		11	50	13	5	7	4	2		2		
7	桑 畑			2		9	2	65	2	17	4					
8	ゴルフ場						4		90	1		3		1		
9	草 地 1					2	1	15	1	82						
10	草 地 2			2		1	8	7	3	1	78					
11	広 葉 樹						1		1			79	6	12		
12	杉・桧											2	90	8		
13	松						2					8	16	75		
14	月・湖・沿岸水														98	2
15	海 水				1							1			1	96

表3-7 2時期および1時期のデータを使用した場合の分類マトリクスの対角線要素の値(%)

系	番 号	土地被覆 カテゴリー	D	T	D	T	系毎の平均値			D	T	D	T	系毎の平均値		
			7	2	8	3	7	2	8	3	7	2	8	0	7	2
市 街 地 系	1	市 街 地	88	85	91	80	74	90	88	81	89	80	78	88		
	2	住 宅 地	69	76	84				69	73	81					
	3	造 成 地	76	40	88				76	59	87					
	4	大きな建物	86	96	96				86	97	95					
農 地 系	5	水 田	34	92	95	46	76	87	34	52	56	46	47	57		
	6	畑	26	70	80				26	43	50					
	7	桑 畑	77	66	87				77	45	65					
草 地 系	8	ゴ ル フ 場	81	59	92	70	63	94	81	79	90	70	61	83		
	9	草 地 1	90	87	94				90	86	82					
	10	草 地 2	39	43	95				39	18	78					
森 林 系	11	広 葉 樹	76	95	95	77	84	89	76	79	79	77	80	81		
	12	杉・桧	91	89	93				91	85	90					
	13	松	63	69	79				63	77	75					
水 系	14	河・湖・沿岸水	98	100	100	98	100	99	98	88	98	98	74	97		
	15	海 水	97	100	98				97	60	96					
全カテゴリーの平均値			73	73	91				73	68	81					

3.4.5 土地被覆分類画像

3.3.2で選定されたトレーニングデータを使用して最尤法分類によりテストサイト全域の土地被覆分類を行ってみた。DT72、DT83およびDT7283による土地被覆分類画像を図3-8に示す。全体的にDT83による画像がDT7283による画像にかなり似ており、2時期のデータの中、5月のデータが分類結果に大きく影響していることが分かる。利根川沿いの水田がDT7283、DT83による画像では明瞭に分類されているが、DT72の画像では桑畑になっているのが目立つ。表3-2の分類マトリクスでも水田が25%も桑畑に誤分類されている。又DT72の画像では畑の部分がかなりゴルフ場になっている。DT83の画像ではDT7283の画像に比べて畑が少なくなっており、かなり住宅地になっているようである。

3.5 要約

本章を要約すれば以下の通りである。

(1) 複数時期のランドサットデータを使用したこれまでの研究は、農作物の分類への有効性と分類精度を調査したものが多いが、土地被覆一般について単一時期と複数時期の場合について分類精度を調査したものはない。

(2) 物質は固有の分光反射特性を持っていることを利用してマルチスペクトルデータにより土地被覆分類を行うことが出来、その原理と手順を説明した。

(3) 東京、茨城、千葉の1部を含む約110km四方の領域をテストサイトとして、ランドサットMSSデータの同季節(11月同志)および異季節(5月と11月)の重ね合わせデータを作成し、重ね合わせデータ使用による土地被覆分類精度向上率を調査した。

(4) 15項目の土地被覆カテゴリーを設定し、テストサイトのランドサットMSS画像、地形図、植生図を参照しながら、各土地被覆カテゴリーのトレーニ

ング領域を選定し、トレーニング領域のデータの選定されたカテゴリーへの分類比率を調べることにより、1 時期および2 時期の重ね合わせデータを使用した場合の分類精度を調べた。

(5) 2 時期の重ね合わせデータを使用することにより土地被覆分類精度は、異季節の場合1 時期の場合の約75%から約15%向上し、同季節の場合1 時期の場合の約70%から10%向上することを示した。

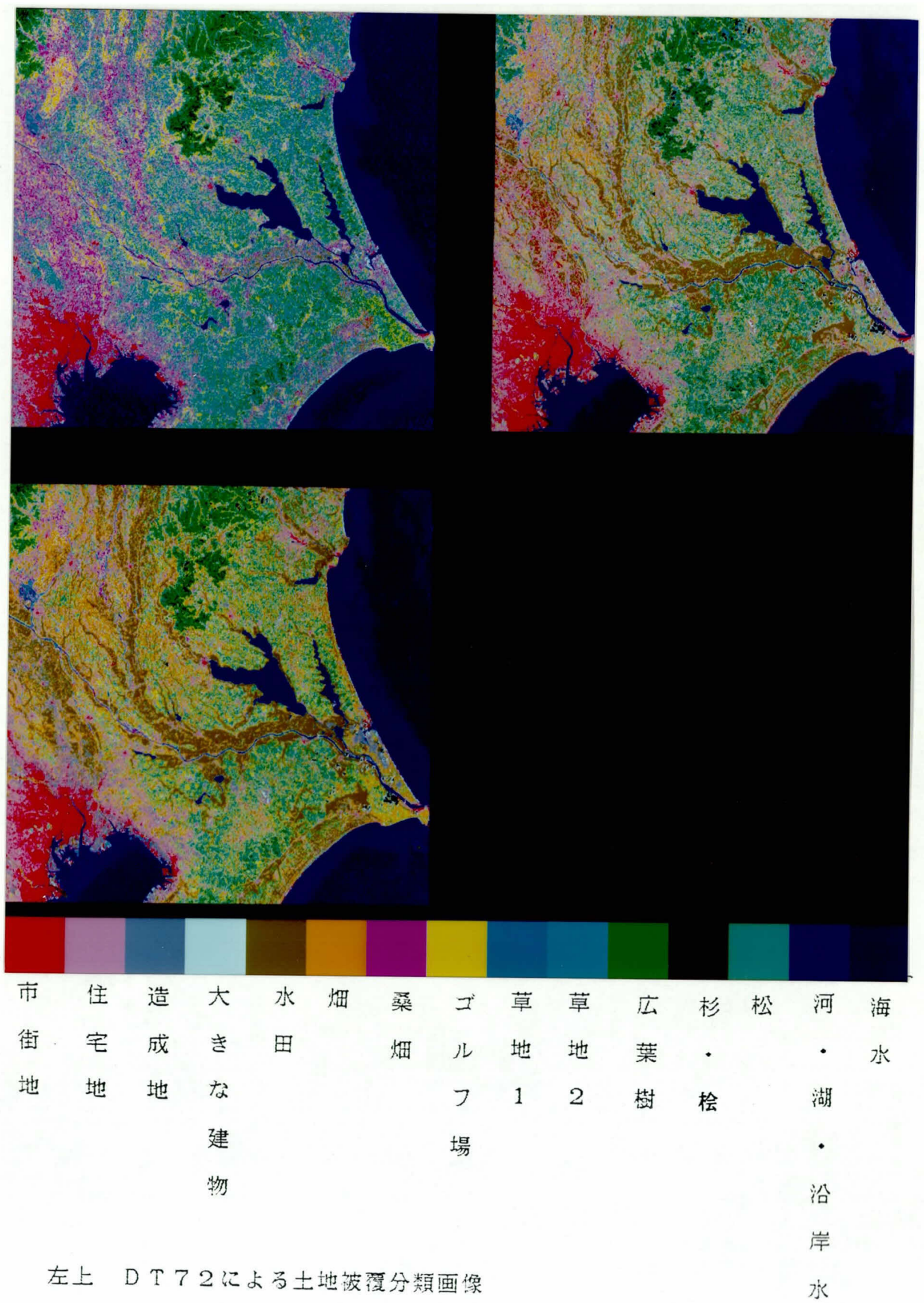
(6) 2 時期のデータを重ね合わせる場合、それぞれの時期のランドサットMS Sデータのバンド5と7を抜き出して重ね合わせた。バンド5と7はそれぞれ可視域と近赤外域のバンドであり、両バンド間の相関は低い。結局2 時期のデータを重ね合わせることによる分類精度が向上する要因としては次の2つが考えられる。

(i) それぞれの時期のデータから互いに相関の低いバンドを抜き出して使用することが出来る。

(ii) それぞれの時期により分光反射特性が変化したデータを使用することが出来る。

同季節の場合でも分類精度が向上しているのは(i)の要因によるものと考えられる。また、(i)の要因の方が(ii)の要因より分類精度向上の寄与率が多いことを示した。

(7) 土地被覆カテゴリーを市街地系、農地系、草地系、森林系、水系に大別すると、2 時期データ使用による改善度の順位は農地系、草地系、市街地系、森林系、水系の順になっていること示し、これは時期による分光反射特性の変化が大きいと考えられる順序になっている。



左上 DT72による土地被覆分類画像
 右上 DT83による土地被覆分類画像
 左下 DT7283による土地被覆分類画像

図3-8 1時期及び2時期のデータによる土地被覆分類画像

4.1 序

衛星リモートセンシングの最も大きな特長は広域を繰り返し観測する事ができることである。異なった時期に観測されたデータを使って、その間に地表面の状況が変化した部分を抽出することは、衛星データの最も有力な応用方法である。

変化部分の自動抽出に関してはすでに航空機リモートセンシングデータを使って研究が行われている^{39), 40)}。Kawamuraは航空写真を使って都市の開発地域を抽出しようとし、変化抽出の尺度として相関係数、エントロピー、High-Intensity Probability (ある閾値以上の値の確率) について調査した³⁹⁾。Lillestrandは航空機搭載側方視レーダー (SLAR: Side Looking Airborne Radar) の画像から変化部分のみを高速に抽出するシステムの開発を行い、人間の眼で調べるよりも効率的であることを示した⁴⁰⁾。

ランドサットデータによる変化抽出の研究も数多く報告されている^{41)~58)}。これらの研究結果を基に2時期の重ね合わせデータから変化を抽出する方法を整理すると次のようになる。

- ・ 個別分類法^{41), 42), 43), 44)}
- ・ 変化部分強調法
 - 差画像法^{45)~53), 58)}
 - 比演算法^{43), 54), 55), 56)}
 - 主成分変換法^{57), 58)}

個別分類法はマルチスペクトル分類により個別に土地被覆分類を行い、分類結果を比較して変化した部分を抽出する方法である。この方法により、落合らは都市周辺の土地利用変化抽出を試みた⁴¹⁾。Weismillerらは沿岸地域環境の変化抽出に際して、(1)個別分類法と、(2)各バンド毎の2時期の差画像を使って分類する法、(3)2時期のデータを統合して分類する方法、(4)統合データを使ってツリー型分類⁴⁵⁾を行う方法、の4つの方法について検討し個別分類法による抽出結果が最も信頼できたとしている⁴²⁾。また個別分類法による結果を基準として他の3つの方法による結果を定性的に評価し、(2)と(4)による結

果が(1)とほぼ同じ結果を示し、(3)による結果は(1)とかなり違った結果を示したとしている。Howarthらは環境変化を監視する方法として比演算を表示する方法と個別分類法について研究し、個別による分類結果から変化マトリクスを分析することなどにより、変化の原因を推察することができると述べている⁴³⁾。Wickwareらは個別分類法による植生の変化抽出を行い、分類に際し教師有法と教師なし法を比較し教師有法の方が結果が良かったとしている⁴⁴⁾。

変化部分強調法は2時期のデータの間で変化している部分を強調する処理をした後で変化部分を抽出しようとする方法であり、変化強調の方法により差画像法、比演算法、主成分変換法がある。

差画像法は2時期データ間で画素毎に引き算を行って作成した差画像を使って変化部分を抽出する方法である。この方法を使って都市周辺の土地被覆変化の抽出^{47)、48)}、火山噴火の降灰領域の抽出⁴⁹⁾、森林の転用と伐採地の抽出⁵¹⁾等の研究が行われている。差画像を作成する前に、2時期のデータの輝度レベルを回帰により合わせる必要があり、この回帰に変化していないと思われる部分のデータを選択して使用している^{48)、49)、51)}。Eghbaliは差画像による変化部分抽出の閾値決定にKolmogorov-Smirnov test⁵⁰⁾を提案し、ランドサットデータを使った森林の伐採地抽出においてその有効性を検証している⁵⁰⁾。RobinsonらはランドサットデータからAlbedo(反射能:ある波長域全域の分光反射率の平均)に変換し、Albedoの差画像を乾燥地の監視に応用した⁵²⁾。またFrankはAlbedoに変換した後、回帰により両者の値を合わせて残差画像を作成し、半乾燥地帯の環境変化の監視に応用する研究を行った⁵³⁾。

比演算法は2時期のデータ間で画素毎に割り算を行って作成した比画像を使って変化部分を抽出する方法である。Howarthらはバンド5と7の比画像を表示することにより冠水地域や植生の変化領域を迅速に把握する方法を示した⁴³⁾。また彼らは別の報告において、都市周辺の変化抽出にバンド5と7の差と和の比の画像が有効であったとしている⁵⁵⁾。NelsonはランドサットMSSデータの差画像および比画像を使って昆虫による森林の被害領域抽出を試みている⁵⁶⁾。

主成分変換法は2時期のデータを統合して主成分分析法³⁸⁾により変換した

データを使って変化した部分を抽出する方法である。Byrneらはこの方法について検討し、第3主成分と第4主成分の画像が変化の抽出に有効であったと報告している⁵⁷⁾。松岡は平均と標準偏差により正規化した後、各バンドの和の成分と可視域と近赤外域の差の成分（主成分変換の第1と第2の主成分にはほぼ対応）を使って土地被覆変化部分の検出を行った⁵⁸⁾。

個別分類法ではそれぞれの分類結果が正しければ、ある土地被覆カテゴリーから他の土地被覆カテゴリーに変化した部分をすべて抽出することができるが、この方法による変化抽出の精度はそれほど良くない⁵⁹⁾。またそれぞれの分類が独立に行われるため地表面が変化した部分の分光反射特性の変化の情報が使用されない。差画像法はそれぞれのデータの輝度レベルの差を直接利用するので個別分類法に比べ微妙な変化を抽出することが出来る。また輝度レベルの差の大きさにより変化の程度を推定することが出来る。しかし差画像による方法だけではいろいろな原因によりデータの値が変化した部分が同時に抽出されるので、個別分類法などを併用しながら目的とする変化部分を抽出する方法が最も良いと考えられる。

2時期の重ね合わせデータから差画像を作成する場合、画素毎に輝度レベルの差をとる前に、各データの観測時の太陽光の日射強度や大気による減衰量の違いによる輝度レベルの相違を補正（データ間輝度補正という）してやる必要がある。本研究では、データ間輝度補正の方法として、地表面が変化していない部分の画素を自動的に選別し、その部分の画素のデータを使って回帰により補正（選別画素間回帰による輝度補正）する方法を開発した⁶⁰⁾。この基本的考え方については著者はすでに文献⁴⁸⁾・⁴⁹⁾・⁵¹⁾において示しているが、回帰に使用する画素の選別方法、選別された画素の分布と土地被覆カテゴリー、季節の異なるデータ間の輝度補正への適用性等について調査した。

本章では先ず4.2でランドサットデータの変化と土地被覆変化との関係について述べ、4.3で選別画素間回帰による輝度補正について述べる。

4.2 ランドサットデータの変化と地表面変化状況との関係

物質は固有の分光反射特性を持っているのでランドサットデータの各バンド

のデータの変化から地表面の変化状況を推定することが出来る。ランドサット M S S のバンド 5 および T M のバンド 3 は可視域であり、この波長域のデータの増加は一般的に人工構造物の増加、植生の減少を示す。又 M S S のバンド 6 と 7 および T M のバンド 4 は近赤外域で、この波長域のデータの増加は植生の増加を示す。ランドサットデータの各バンドのデータの変化と地表面の変化状況との関係を表 4-1 に示す。M S S のバンド 5 および T M のバンド 3 のデータの増加は森林が伐採されたり、森林や農地がゴルフ場、住宅地、市街地などに土地利用が変化したことを示す。森林が伐採されると通常下の草が露出し、草は高い反射特性を示す。また人工構造物はこれらのバンドに対して高い反射特性を示すため、森林や農地から住宅地、市街地への変化は人工構造物の増加を意味し、これらのバンドの観測値は高くなる。

M S S のバンド 5 および T M のバンド 3 の波長域は植物体の中に含まれているクロロフィルの吸収帯に相当し、森林の樹木が成長するとクロロフィルの含有量が増加し、これらのバンドのデータの値が減少する。又造成地から住宅地に変わると、一般に住宅の周りに木が植えられたりするため同様の変化を示す。

M S S のバンド 6、7 および T M のバンド 4 の波長域の反射特性は植生の活性度の指標であり、これらのバンドのデータの増加は森林、草地、農地など植生領域の増加や、農作物が成長したことを示す。反対に森林や農地などの植生が減少した場合、あるいは森林や農作物が病中害を受けた場合、植生の活性度が減少し、これらのバンドのデータの値が減少する。

表 4-1 ランドサットデータの変化と地表面の変化状況との関係

ランドサット データの 変化	地表面の変化状況	
	MSSバンド 5 TMバンド 3	MSSバンド 6、7 TMバンド 4
増加	植生の活性度減少 森林→伐採地 森林→農地 森林、農地→造成地 市街地、人工構造物 の増加	植生の活性度増加 森林、草地、農地の増加 農作物の成長
減少	森林の樹木の成長 造成地→住宅地	植生の活性度減少 森林、草地、農地の減少 森林、農作物の病中害領域の増加

4.3 選別画素間回帰による画像の輝度補正と差画像作成

4.3.1 画像処理手順

選別画素間回帰による画像の輝度補正と輝度補正した画像を使つての差画像作成手順を図 4-1 に示す。輝度補正演算は対応するバンド毎に行う。

(1) 重ね合わせ画像 G_1 と G_2 についてそれぞれの画像の平均値と標準偏差を計算し、画像 G_2 の平均値と標準偏差を G_1 の平均値と標準偏差に等しくした画像 G_2' を作成する。この平均値と標準偏差を計算する場合に画像全域のデータを使用しても良いが、特定の領域のみのデータあるいは特定間隔毎の画素の

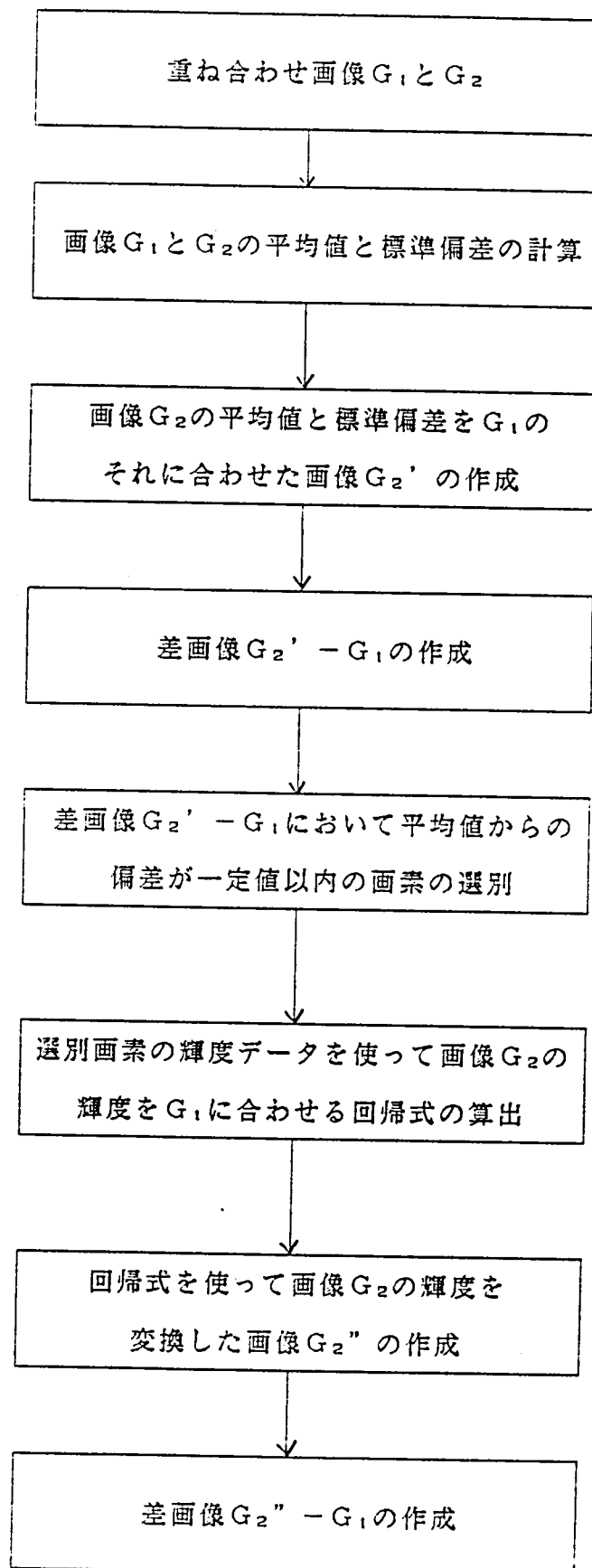


図 4 - 1 選別画素間回帰による画像の輝度補正と差画像作成手順

データを選定することが出来るようにした。これにより明かに片方の画像に雲がある場合に雲を避けることが出来る。画像 G_1 と G_2 の平均値と標準偏差をそれぞれ M_1 、 S_1 、 M_2 、 S_2 とする画像 G_2' の輝度を次式により計算する。

$$B_2' = \frac{S_1}{S_2} \times B_2 + M_1 - \frac{S_1}{S_2} \times M_2 \quad (4-1)$$

B_2 : 画像 G_2 の輝度
 B_2' : 画像 G_2' の輝度

(2) 画像 G_2' の輝度から画素毎に G_1 の輝度を引き算して差画像 $G_2' - G_1$ を作成する。画像 G_1 と G_2 の間で地表面の状況が変化していないような部分では、この差画像において平均値 (= 0) に近くなり、変化している部分では平均値からずれた値になる。

(3) 差画像 $G_2' - G_1$ において平均値からの偏差が一定値以内の画素 (選別画素という) を選別する。この選別画素の画像 G_1 と G_2 の間で対応する輝度データを使って、 G_2 のデータから G_1 のデータへの 1 次回帰式を求める。回帰に使用するデータは選別画素の周りの 8 画素を含めた 3×3 の画素の平均値を使用することにした。回帰に使用する画素の選別において、全画素を対象とせず、特定間隔毎に抜き出した画素を対象としたのでこの平均処理を行うことにした。

(4) (3) で求めた 1 次回帰式を使って画素 G_2 の輝度を変換した画像 G_2'' を作成する。この G_2'' が選別画素間回帰により輝度補正された画像である。

(5) 画像 G_2'' の輝度から画素毎に G_1 の輝度を引き算して差画像 $G_2'' - G_1$ を作成する。

以上の処理により画像 G_1 と G_2 の間で地表面の状況が変化していない部分は回帰により輝度が同じになり、変化している部分は輝度が同じにならず、従って差画像 $G_2'' - G_1$ において平均値からのずれとして抽出されやすくなると考えられる。

4.3.2 回帰による2つの画像の輝度補正

回帰による2つの画像の輝度補正の方法を図4-2に示す。対応する画素の画像 G_1 と G_2 の輝度データをそれぞれの画像の輝度を軸とした座標にプロットした場合、画像 G_2 の輝度を G_1 に合わせる回帰直線は各点からY軸に平行な方向の距離（図4-2の各点からの線分）の自乗の和が最小になるような直線である。回帰直線の式を $Y = AX + B$ とすれば、対応する画素の画像 G_1 と G_2 の輝度をそれぞれYとXに代入して観測方程式を作成し、最小自乗法により係数A, Bを求めれば良い。この回帰式算出に選別画素の輝度データのみを使用することにした。

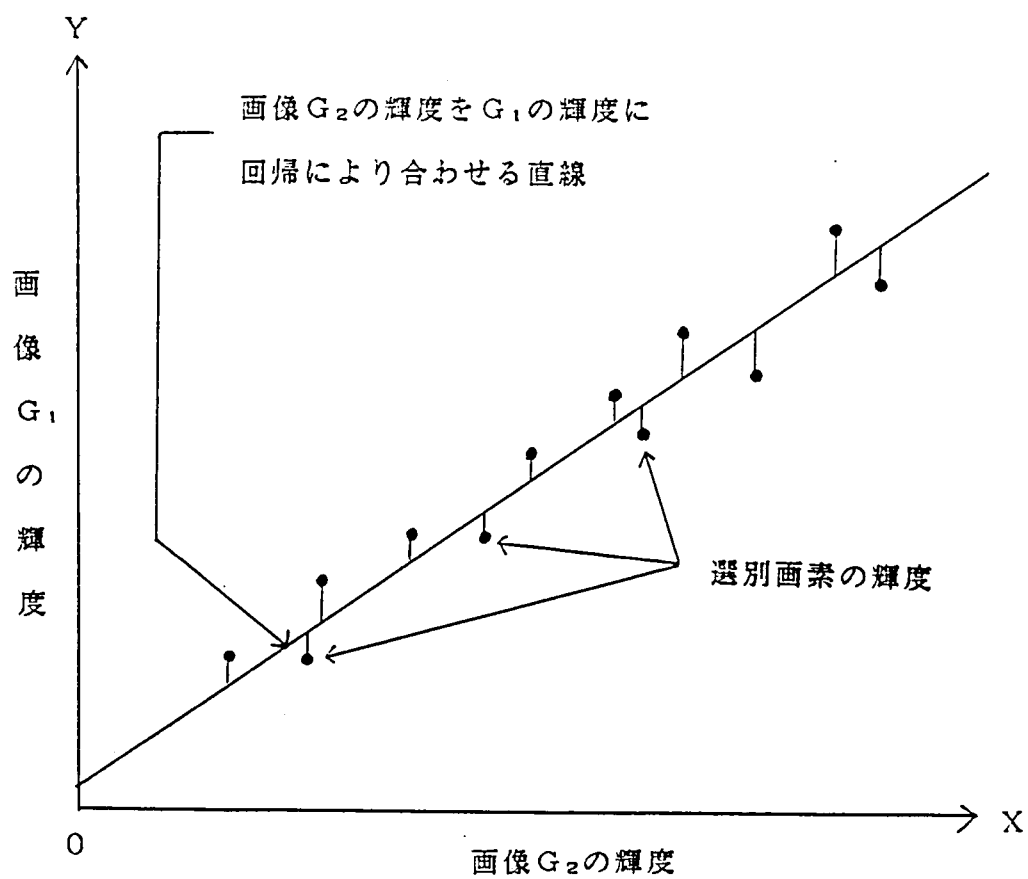


図 4 - 2 回帰による 2 つの画像の輝度補正

4.3.3 輝度補正画像の作成

図2-3に示す約110km四方の領域をテストサイトとして、第3章の研究で使った3時期の重なったランドサットデータを使って次の2つのケースについて選別画素間回帰による輝度補正画像を作成した。

(1) 輝度補正ケース1 1980年11月11日の画像の輝度を1972年11月26日の画像の輝度に合わせる。

(2) 輝度補正ケース2 1983年5月18日の画像の輝度を1972年11月26日の画像の輝度に合わせる。

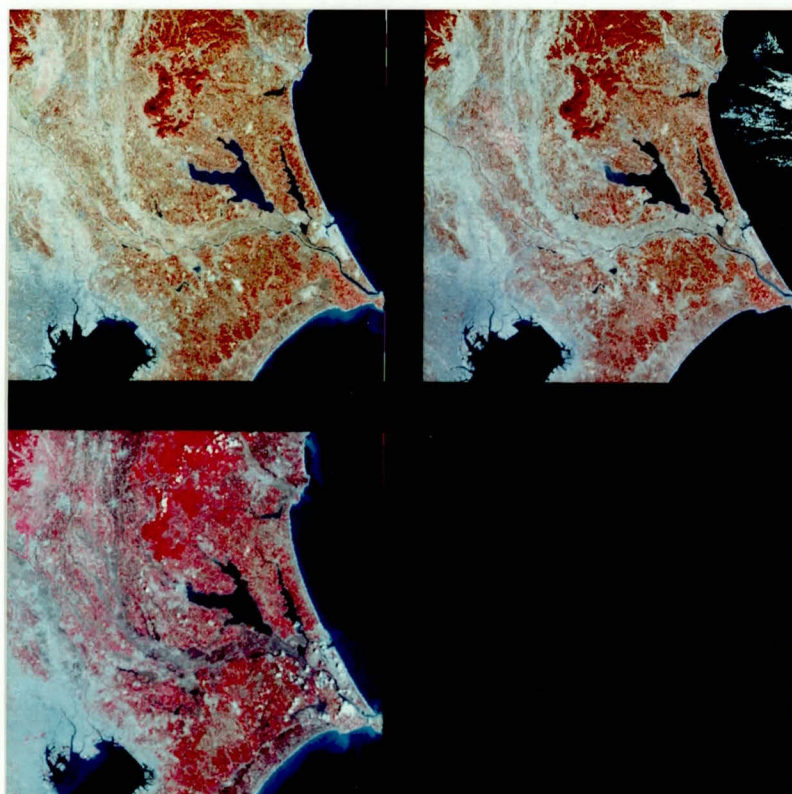
ケース1は季節がほぼ同じ場合であり、ケース2は季節が違う場合である。平均値と標準偏差を合わせるために使用するデータとしてピクセルおよびライン方向に4個に1個の割合で間引いた画像のデータを使用した。又選別画素選定のための差画像における平均値からの偏差の範囲は $\pm 0.3\sigma$ (σ は差画像の標準偏差)以内とした。偏差の範囲を大きくすると選別画素の数が多くなり、そのデータを使って回帰処理を行った場合の残差の標準偏差が大きくなる。範囲の大きさを変えて残差の標準偏差が1レベル程度になるような範囲を求めると $\pm 0.3\sigma$ 以内であった。ケース1と2の輝度補正の計算結果を表4-2に示す。この表から 0.3σ の値は約0.8~1.7の範囲になっており、平均値と標準偏差を合わせたあと輝度の差が1~2以下の画素が選別されている事になる。

輝度補正前の3種類のランドサットMSSデータの原画像(フォールスカラー画像)を図4-3(a)に示す。1980年の画像は1972年の画像に比べて少し明るいいため、表4-2において回帰係数Aが約0.8になっている。1983年の画像は観測時期が5月のため非常に明るく、ケース2の回帰係数Aが0.5~0.6になっている。各ケースのバンド7の係数Aが0.530, 0.291と小さくなっているのは、1972年の原データのバンド7の値が最大6ビット(他のデータは7ビット)で補正されているためである。又画像の中央で原画像同志を接合した画像と、原画像と輝度補正画像を接合した画像を図4-3(b)に示す。原画像同志では明るさの違う画像が輝度が補正されて接合されているのが分かる。ケース1では季節が同じため接合部は分からないが、ケース2で

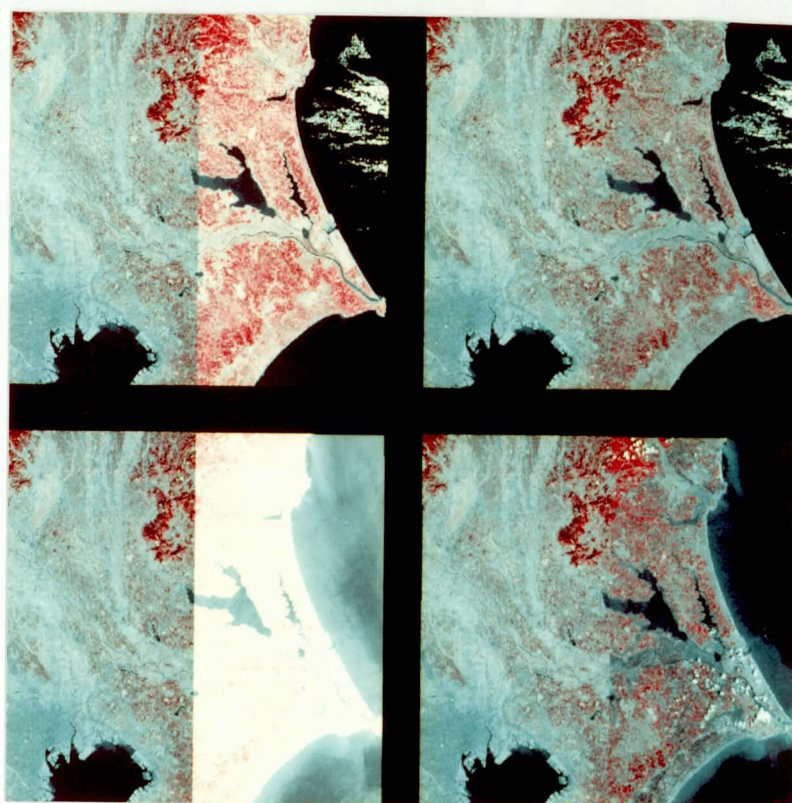
は季節が異なるため植生の状況が変化している部分などで接合部が少し目立つ。

表4-2 選別画素間回帰による輝度補正の計算結果

ケース	計算項目	バンド4	バンド5	バンド6	バンド7
輝度補正 ケース1	差画像 $G_2' - G_1$ の標準偏差 (σ)	3.586	4.230	5.383	2.733
	0.3σ	1.076	1.269	1.615	0.820
	回帰係数 $Y = AX + B$	A	0.889	0.794	0.877
		B	6.054	1.797	0.934
	回帰の残差の 標準偏差 (σ_R)	1.009	1.007	0.689	0.830
	相関係数	0.920	0.965	0.983	0.985
輝度補正 ケース2	差画像 $G_2' - G_1$ の標準偏差 (σ)	3.416	4.430	5.643	3.391
	0.3σ	1.025	1.329	1.693	1.017
	回帰係数 $Y = AX + B$	A	0.611	0.629	0.504
		B	2.030	-1.531	-2.611
	回帰の残差の 標準偏差 (σ_R)	0.978	1.349	1.605	0.955
	相関係数	0.910	0.939	0.980	0.980



(a) 原画像 左上：1972 11/26、右上：1980 11/11、左下：1983 5/18



輝度補正
ケース 1

輝度補正
ケース 2

(b) 左：原画像同志の接合、右：原画像と輝度補正画像の接合

図 4-3 輝度補正に使用した(a)原画像と(b)中央部で原画像同志および原画像と輝度補正画像を接合した画像

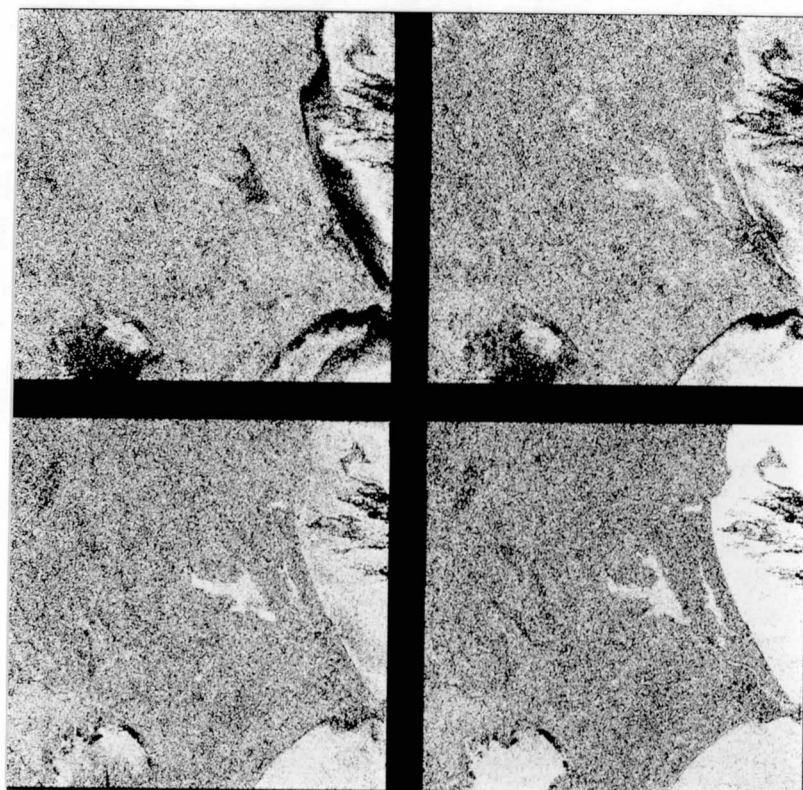
4.3.4 選別画素の分布

各輝度補正ケースの回帰に使用した選別画素の分布を画像にして見た。その結果を図4-4に示す。同図において黒くなっている部分が回帰に使用されない部分であり両方の画像間で何等の変化がある部分である。選別画素の割合はケース1では対象となった画素の44%であり、ケース2では35%であった。季節が同じ場合に比べて季節が異なる場合の方が変化しない部分の割合が少なくなっていることを示しており、当然の結果であると考えられる。

(1) ケース1の選別画素の分布

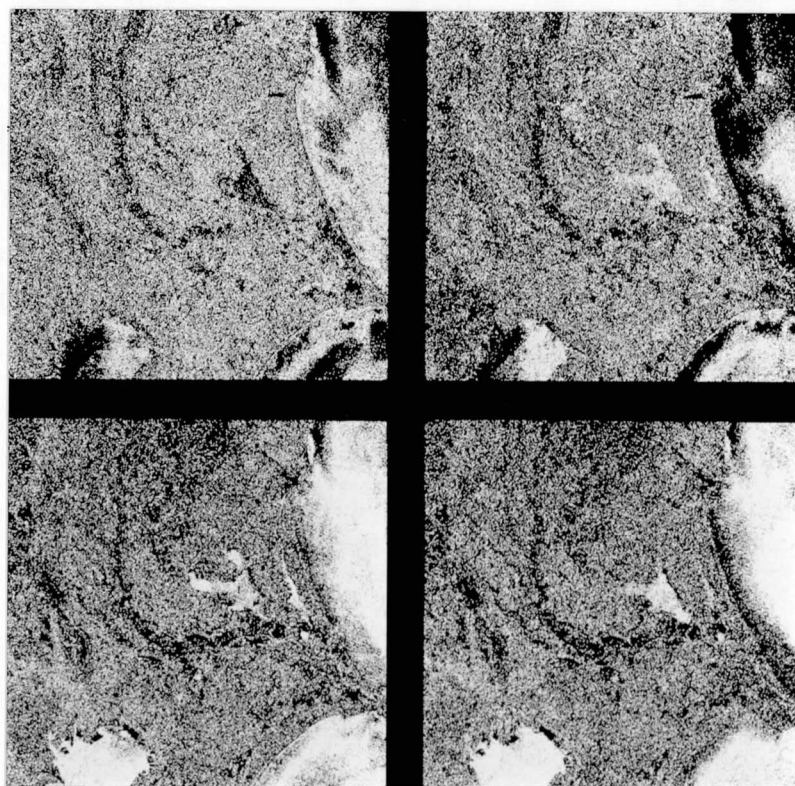
図4-4の(a)を見ると全バンド共通の現象としてとして画像の右側の部分や東京湾沿岸の部分が選別されていない。図4-3(a)の1980年の画像(右上)の右側に雲があり、又東京湾沿岸では1972年の画像(左上)になかった埋立地が1980年では出来ている。各バンド個別に見ると、バンド4では霞ヶ浦、東京湾の中央部、沿岸海洋水、鹿島工業地帯、成田空港周辺が選別されていない。図4-3(a)の原画像を見ると霞ヶ浦、沿岸海洋水の部分では1972年の画像が青っぽく、東京湾中央部では1980年の画像が少し青っぽくなっているため選別されていないと考えられる。鹿島工業地帯、成田空港周辺では1972年当時造成が盛んに行われていたため、1972年の画像では1980年に比べ白っぽい部分が多くなっており、選別されていないと考えられる。バンド5では沿岸水の一部、東京湾中央部、鹿島工業地帯、成田空港周辺が選別されていない。バンド6と7では選別画素の分布はほぼ同じである。左上に黒い部分があるのは水田の一部である。原画像を見ると1972年において稲を刈った後に薄く草が生えているが見られそのために選別されていない。

第3章の研究で作成した1972年と1980年の重ね合わせ画像DT7280による土地被覆分類結果を使って、選別画素の各バンドのカテゴリの比率を調べてみた。その結果を表4-3に示す。この表において選別対象領域のカテゴリの比率というのは、回帰に使用する画素を選別する際に画像全域からピクセル及びライン方向に4個に1個の割合で間引いた画素(選別対象領域



左上：バンド4
 右上：バンド5
 左下：バンド6
 右下：バンド7

(a) 輝度補正ケース1



左上：バンド4
 右上：バンド5
 左下：バンド6
 右下：バンド7

(b) 輝度補正ケース2

図4-4 各輝度補正ケースの回帰に使用した選別画素の分布

という)を対象としたが、それらの画素のDT7280による分類カテゴリーの比率である。各カテゴリー毎の選別画素の比率は、選別対象領域の中のカテゴリーの画素数に対するそのカテゴリーの選別画素数の比率である。表4-3を見るとバンド4、5では針葉樹、広葉樹、住宅地が多く、造成地が少なくなっている。またバンド4単独では河・湖・沿岸水が少なくなっている。広葉樹、針葉樹は季節が同じ11月同志のデータではバンド4、5の値の変化は少なく、又住宅地は時期によらずデータの変化が少ないと考えられる。造成地は1972年当時裸地の状態であったのが、1980年では若干植生が存在する状態になっているため選別されている割合が少なくなっているものと考えられる。バンド6、7では水域、市街地が多く、ゴルフ場、草地が少なくなっている。水域、市街地はバンド6、7の反射が小さいため、両方のデータの間の変化は小さいと考えられる。ゴルフ場、草地はバンド6、7の反射が大きいため、両方のデータ間の変化が大きいと考えられる。以上の結果からも選別された画素は2時期のデータ間で変化していない部分が抽出されていると考えられる。又表4-3を見ると選別画素としては比率に大小があるすべてのカテゴリーが含まれているのが分かる。バンド間の選別画素の分布の一致率を調べてみると平均55%であった。

(2) ケース2の選別画素の分布

図4-4の(b)を見ると全バンド共通の現象として画像中央部から上部にかけて帯状に黒くなっている部分が目立つ。この部分は水田であり、図4-3(a)の1983年の原画像(左下)を見ると水田が田植期で黒くなっているが、1972年の画像では稲が刈り取られて白っぽくなっているため選別されていないのが分かる。さらにケース1に比べて違う点は沿岸海洋水が各バンドにおいてかなり多く選別されていない。1983年の画像においてよごれた河川水が沿岸海域に流出しているのが見られる。各バンド個別に見るとバンド4では霞ヶ浦、東京湾の一部、沿岸海洋水の一部、鹿島工業地帯が選別されていない。バンド5では東京湾の一部、沿岸海洋水の多くの部分、鹿島工業地帯が選別されていない。図4-3(a)の原画像を見ると霞ヶ浦、沿岸海洋水の部

分では1972年の画像が青っぽく、東京湾の一部では1983年の画像が青っぽくなっているため選別されていないと考えられる。鹿島灘の沿岸部分では、1972年の画像ではかなり青っぽくなっているが、1983年の画像では薄く白っぽくなっており、両方の時期において汚れの度合いが違うと推定される。このため鹿島灘の沿岸海洋水がバンド4では選別されているが、バンド5では選別されていないと考えられる。鹿島工業地帯が選別されていないのはケース1と同じ理由と考えられる。バンド6と7ではケース1と同様選別画素の分布はほぼ同じである。選別されていない部分として目立つのは上述の水田の部分と上部中央の黒い部分である。この部分は山地の森林であり5月に近赤外域の反射が強くなるため選別されていない。

第3章の研究で作成した1972年と1983年の重ね合わせ画像DT7283による土地被覆分類結果を使って、選別画素の各バンドのカテゴリの比率を調べてみた結果を表4-4に示す。バンド4、5では針葉樹が多く造成地が少ない。理由としてはケース1と同じ事が考えられる。バンド6、7で水域、住宅地が多く、広葉樹、水田が少なかった。水域、住宅地ではバンド6、7の反射が小さいため両方のデータの間で変化は小さいと考えられる。5月のデータでは、広葉樹は近赤外域の反射が強く、又水田は田植期で水分が含まれているため近赤外域の反射が弱くなり、両方のデータの間で変化が大きくなると考えられる。以上の結果からも選別された画素は2時期のデータ間で変化していない部分が抽出されていると考えられる。又表4-4を見ると比率に大小があるが殆どのカテゴリが含まれているのが分かる。バンド6、7で草地1、2が0近くなっているが、これは元々選別対象領域内での面積比率0.5~0.7%を非常に少ないためである。各バンド間の選別画素の分布の一致率を調べてみると平均46%であった。

表4-3 重ね合わせデータDT7280を使った分類結果による選別対象領域のカテゴリの比率と選別画素のカテゴリの比率（輝度補正ケース1）

番号	土地被覆 カテゴリー	対象領域の カテゴリー の比率(%)	カテゴリー毎の選別画素の比率(%)			
			バンド4	バンド5	バンド6	バンド7
1	市街地	3.6	45	46	57	52
2	住宅地	8.5	52	54	57	47
3	造成地	3.8	17	13	27	31
4	大きな建物	0.5	7	6	7	10
5	水田	15.1	38	35	34	31
6	畑	14.1	47	43	34	27
7	桑畑	5.8	39	27	41	42
8	ゴルフ場	4.2	40	33	24	20
9	草地1	4.4	48	51	36	24
10	草地2	1.9	30	22	9	2
11	広葉樹	5.8	52	50	33	20
12	杉・桧	1.7	71	81	38	29
13	松	6.9	57	45	51	45
14	河・湖・沿岸水	6.4	24	46	63	76
15	海水	17.2	42	58	67	91

カテゴリー毎の選別画素の比率

$$= \frac{\text{選別画素の各カテゴリー毎の画素数}}{\text{選別対象領域の各カテゴリー毎の画素数}} \times 100$$

表4-4 重ね合わせデータDT7283を使った分類結果による選別対象領域のカテゴリの比率と選別画素のカテゴリの比率（輝度補正ケース2）

番号	土地被覆 カテゴリ	対象領域の カテゴリ の比率(%)	カテゴリ毎の選別画素の比率(%)			
			バンド4	バンド5	バンド6	バンド7
1	市街地	3.5	29	14	32	29
2	住宅地	9.1	38	33	42	47
3	造成地	4.3	18	18	31	39
4	大きな建物	0.4	3	3	6	12
5	水田	17.7	32	27	10	8
6	畑	19.9	37	32	31	29
7	桑畑	2.1	25	6	27	16
8	ゴルフ場	3.6	36	26	21	22
9	草地1	0.5	49	8	0	0
10	草地2	0.7	34	25	1	0
11	広葉樹	2.9	41	31	7	6
12	杉・桧	1.7	39	71	23	23
13	松	9.6	50	41	27	28
14	河・湖・沿岸水	11.9	40	23	62	46
15	海水	11.7	42	45	88	98

カテゴリ毎の選別画素の比率

$$= \frac{\text{選別画素の各カテゴリ毎の画素数}}{\text{選別対象領域の各カテゴリ毎の画素数}} \times 100$$

4.3.5 他の輝度補正方法との比較

他の輝度補正方法としては(1)平均と標準偏差を等しくする方法と(2)累積ヒストグラムを等しくする方法がある⁹¹⁾。(2)の累積ヒストグラムを等しくする方法は、2つの画像の累積ヒストグラムから適当な間隔(例えば5%間隔)で累積度の等しい点の輝度レベルを調べる。各累積度の2つの画像の輝度レベルの値から回帰式を求め、その回帰式を使って1つの画像の輝度レベルを変換する方法である。中山らは回帰による補正方法(対象領域の全画素を使用)も含めて3つの輝度補正方法について、接合画像の目視による方法などにより評価し、平均・標準偏差法と累積ヒストグラム法が回帰による方法より良かったとしている⁹¹⁾。2つの画像を接合してモザイク画像を作成する場合等全般的な画像の輝度補正方法としては平均・標準偏差法や累積ヒストグラム法が良いと考えられる。又これらの方法は2つの画像が精密に重なっている必要はない。

選別画像間回帰による輝度補正方法は観測時期の異なるデータを重ね合わせ、データ間の地表面の状況が微妙に異なる部分を抽出する場合の有効な輝度補正方法であると考えられる。

4.3.6 差画像作成

回帰式を使って画像 G_2 の輝度レベルを変換した画像 G_2'' を作成し、画素毎に画像 G_2'' から G_1 の輝度レベルを引き算して差画像 $G_2'' - G_1$ を作成する。この $G_2'' - G_1$ が選別画素間回帰により輝度補正したあと得られた差画像である。差画像を作成する場合、負の値を避けるため、また差の値を強調するために次式による変換処理を行った。

$$D' = D \times \frac{25.5}{\sigma_R} + 127$$

σ_R : 回帰係数を求めたときの残差の標準偏差

D : 2つの画像の輝度データの引き算値

D' : 作成した差画像の輝度値

(4-2)

これにより引き算値の0を差画像の変化範囲0～255の中央値127に、 $-5\sigma_R$ を0に、 $+5\sigma_R$ を255に該当させる変換を行っている。差画像と残差の標準偏差で正規化しておくことにより、差画像をスライスする場合にスライス範囲の設定が便利である。作成された差画像は隣接画素間での輝度の変化が激しいため通常ウィンドウサイズ 3×3 の平滑処理を行う。

以上の手順により作成したケース1と2の輝度補正画像から1972年の画像の輝度を差し引いた差画像を図4-5に示す。図4-5の差画像において、白くなっている部分は差をとった2時期の間に輝度が増加した領域を、黒くなっている部分は輝度が減少した領域を示し、変化していない部分は（例えば市街地など）中間の灰色となっている。図4-5（a）の差画像において、右側に白い部分があるが、1980年の画像ではここに雲があり1972年に比べて輝度が高くなっている。又図4-5（a）のバンド4の差画像（左上）で霞ヶ浦や鹿島灘の沿岸部分で黒くなっているが、これらの部分では1980年の観測時の方が水の汚れがひどくなく、1972年に比べてバンド4の輝度が低くなっている。

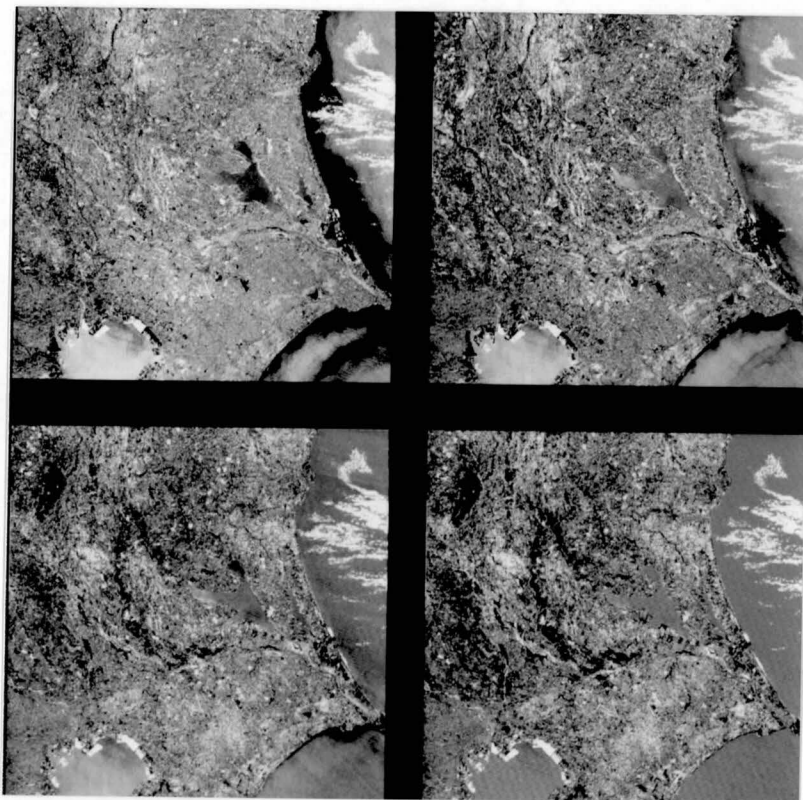
又図4-5（b）差画像において中央部から上部にかけて帯状に黒くなっている部分があるが、ここは水田であり1983年5月の時点では田植期で水分が含まれているため1972年に比べて輝度が低くなっている。又図4-5（b）のバンド6、7の差画像で上部中央に白い部分が見られるが、ここは森林であり1983年5月の時点では近赤外域で強い反射を示し、1972年に比べて輝度が高くなっている。

4.4 要約

本章を要約すれば以下の通りである。

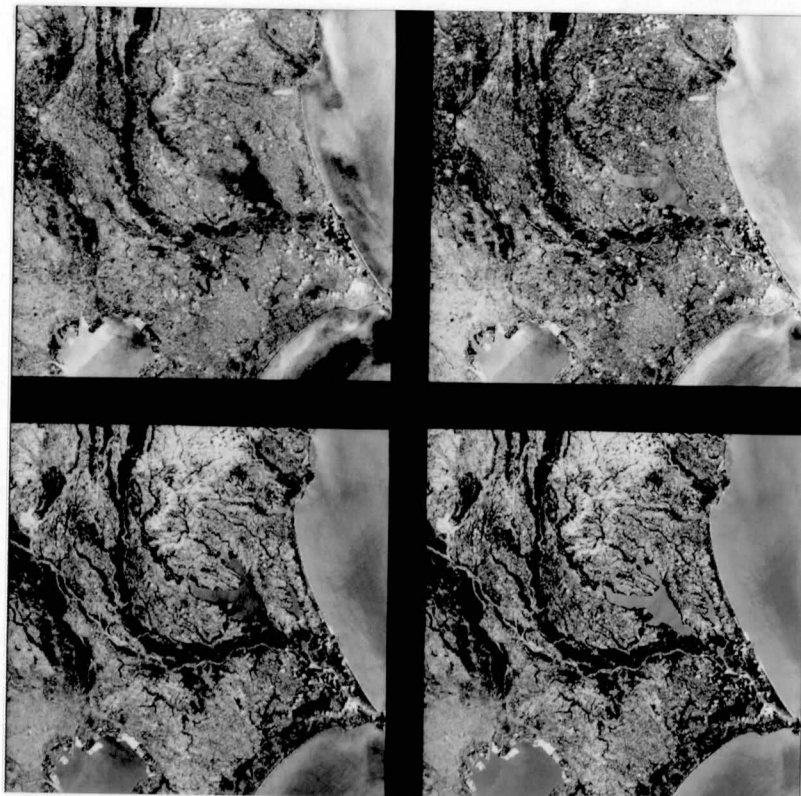
（1）観測時期の異なる衛星データから変化部分を抽出する方法として、個別分類法、差画像法、比演算法、主成分変換法があり、差画像法は微妙な変化を抽出するのに適している。

（2）ランドサットデータの変化から地表面の変化状況を推定することが出来



左上：バンド4
右上：バンド5
左下：バンド6
右下：バンド7

(a) ケース1の輝度補正画像－1972年の画像



左上：バンド4
右上：バンド5
左下：バンド6
右下：バンド7

(b) ケース2の輝度補正画像－1972年の画像

図4-5 ケース1と2の輝度補正画像から1972年の画像の輝度を引いた差画像

る。一般的に可視域バンドの値の増加は植生領域の減少、市街地や人工構造物の増加を示し、近赤外域のバンドの値の増加は植生領域や植生の活性度の増加を示し、それぞれのバンドの値の減少は増加と逆の変化傾向を示す。

(3) 衛星データの重ね合わせ画像からの差画像を作成する場合、観測時の日射強度や大気による減衰量の相異による輝度の違いを補正してやる必要がある。この輝度補正の方法として地表面の変化していない部分を自動的に選別してその部分の画素のデータを使って回帰により補正する方法を開発した。この補正により地表面が変化していない部分は回帰により輝度が同じになり、変化している部分は輝度が同じにならない。

(4) 重ね合わせ画像 G_1 と G_2 の平均値と標準偏差を計算し、 G_2 の平均値と標準偏差を G_1 のそれに等しくした画像 G_2' を作成する。次に差画像 $G_2' - G_1$ において平均値 (0 になる) からの偏差が一定範囲内の画素 (選別画素という) を選別し、この選別画素のまわりの 3×3 の画素の平均値データを使って画像 G_2 の輝度を G_1 の輝度に合わせる回帰式を求める。この式を使って画像 G_2 の輝度を変換した画像 G_2'' を作成した後、最後に差画像 $G_2'' - G_1$ を作成する。地表面が変化した部分は差画像 $G_2'' - G_1$ において、平均値からずれた位置に来ることになり、抽出され易くなる。

(5) この選別画素間回帰の方法により、ランドサット MSS データを使って 1980 年 11 月 11 日および 1983 年 5 月 18 日の画像を 1972 年 11 月 26 日の画像の輝度に合わせてみた。選別画素抽出のための差画像 $G_2' - G_1$ における平均値からの偏差は、差画像の標準偏差を σ として $\pm 0.3\sigma$ 以内とした。この平均値からの偏差は、後に行う回帰の残差の標準偏差が 1 レベル程度になるように設定した。選別された画素の分布を原画像あるいは 2 時期のデータを使用した分類結果を使って調べてみると、大体 2 時期のデータの間で変化していない部分が抽出されていた。

(6) 選別画素を抽出するための差画像 $G_2' - G_1$ における平均値からの偏差の範囲は、後に行う回帰の残差の標準偏差が1レベル程度になるように設定すれば良い事を示した。ケーススタディにおいては、ピクセルおよびライン方向に4個に1個の割合で間引いた画素の中から $\pm 0.3\sigma$ 以内の画素を選別したが、全画素を対象とする代わりに平均値からの偏差の範囲をもっと小さくして選別する方法も考えられる。選別画素抽出の方法についてもう少し検討の余地がある。

(7) 画像の輝度補正方法として回帰による方法以外に(1)平均と標準偏差を等しくする方法、(2)累積ヒストグラムを等しくする方法があり、モザイク画像を作成する場合など画像全体の輝度を合わせる方法としては平均・標準偏差法、累積ヒストグラム法の方が良い。しかし2つの重ね合わせ画像から変化した部分を抽出しようとする場合には選別画素間回帰による輝度補正の方法が良い。

第5章 差画像による地表面変化部分抽出への応用

5.1 序

本章では差画像による地表面変化部分抽出の応用例としてランドサットMSSデータを使って松くい虫の被害領域を抽出した研究を報告する。松は温帯および暖帯地域に位置する我が国の森林の代表的林相の1つであり、海岸の平地や丘陵に多く存在し、木材資源として重要であるばかりでなく、防風林や風致林として我々の生活を守り、潤いを与えてくれている。ところが近年その松に松くい虫の被害が全国的に広がり、資源として重要な松を維持して行く上で深刻な問題となっている。

このような情勢下にあって林野庁や被害の激しい都道府県では被害状況の把握、空中散布や地上散布による薬剤防除、被害木の伐倒駆除等の松くい虫被害対策を行って来ている。被害状況の把握は被害対策の基礎となるものであり、これまで現地での詳しい調査以外に、局部的に航空写真を使用した調査方法が採られて来た。航空写真による松くい虫被害調査の研究としては、赤外カラー写真が有効であり、被害木の本数調査に応用可能であるとしている^{52)、53)、54)}。しかし広い地域を対象とした調査となると航空写真による調査では時間と経費がかかり過ぎ、しかも同時的に全域を調査することは不可能である。

このため著者らは県単位程度の広い地域の松くい虫の被害状況の把握にランドサットデータがどの程度有効であるかの研究^{55)、56)、57)}を行った。2時期のランドサットデータを重ね合わせて差画像を作成し、松くい虫の被害によりランドサットデータが変化した部分を抽出することにより被害領域を抽出しようとした。同様な研究としてはNelsonがランドサットMSSデータを使ってマイマイガ(Gypsy moth)により落葉した地域を抽出する研究を行っている⁵⁸⁾。2時期のデータの差画像、比画像およびバンド7と5の比の差画像(VID法)を使用し、VID法が最も良かったとしている。ランドサットデータを使って松くい虫の被害領域の抽出を行った研究はこれが初めてである。

松くい虫の被害が激しい地域を対象として1972年と1980年に観測されたランドサットMSSデータを使って、その間に発生した被害領域を、被害

の程度を微害、中害、激害の3段階にクラス分けして抽出した。年々の松くい虫の被害量が市町村単位で現地調査により調べられており、このデータを使ってランドサットデータから抽出された被害領域を評価してみると、両者の間には高い相関関係が見られ、ランドサットデータは県単位程度の広い範囲の松くい虫の被害状況把握に有効であることを示した。

5.2 対象領域と使用データ

松くい虫の被害が激しい茨城県の南部と千葉県北部を合わせた約110km四方の範囲を対象領域として選定した。対象領域の概要を図5-1に示す。図2-3に示す画像の重ね合わせの研究を行った領域と同じである。テストエリアTA01とTA02は現地調査を重点的に行った地域を含む512×512画素（約25km四方）の領域である。差画像から松くい虫の被害によりランドサットデータが変化した部分を抽出する際、変化範囲を決定する時のテストエリアとして使用した。

茨城県は170kmに及ぶ長い海岸線を有し、そこには保安林として黒松が植栽されており、一方内陸部、特に県中央部から南部にかけて農耕地の間に平地林が断続的に存在し、その大部分は松で占められている。茨城県の松くい虫の被害は、1971年水戸市南部の郊外に発見されたのが始まりで、以後この点を中心にほぼ同心円状に広がって行き、1979年には被害は全県下におよび、1978年および79年の被害量はそれぞれ70万m³を超す莫大なものとなった。県ではこれに対し、1978年9月松くい虫防除対策室を設置し、薬剤防除などの被害防除活動を行っており、その効果もあって1980年、1981年には被害量はそれぞれ39万m³、32万m³と大幅に減少を示しているが、被害の絶対量としてはまだかなり多い。

茨城県の南部に隣接する千葉県北部には茨城県から続く平地林が広く分布しその約1/3は松である。千葉県における松くい虫の被害は、1947～1948年頃に現在の君津市付近に発生したのが始まりといわれており、その後県南地域に波及しながら被害区域は徐々に広がり、現在全県下に拡大しつつある。被害量は、1978年、1979年には26000m³、19000m³とそれほど大きな

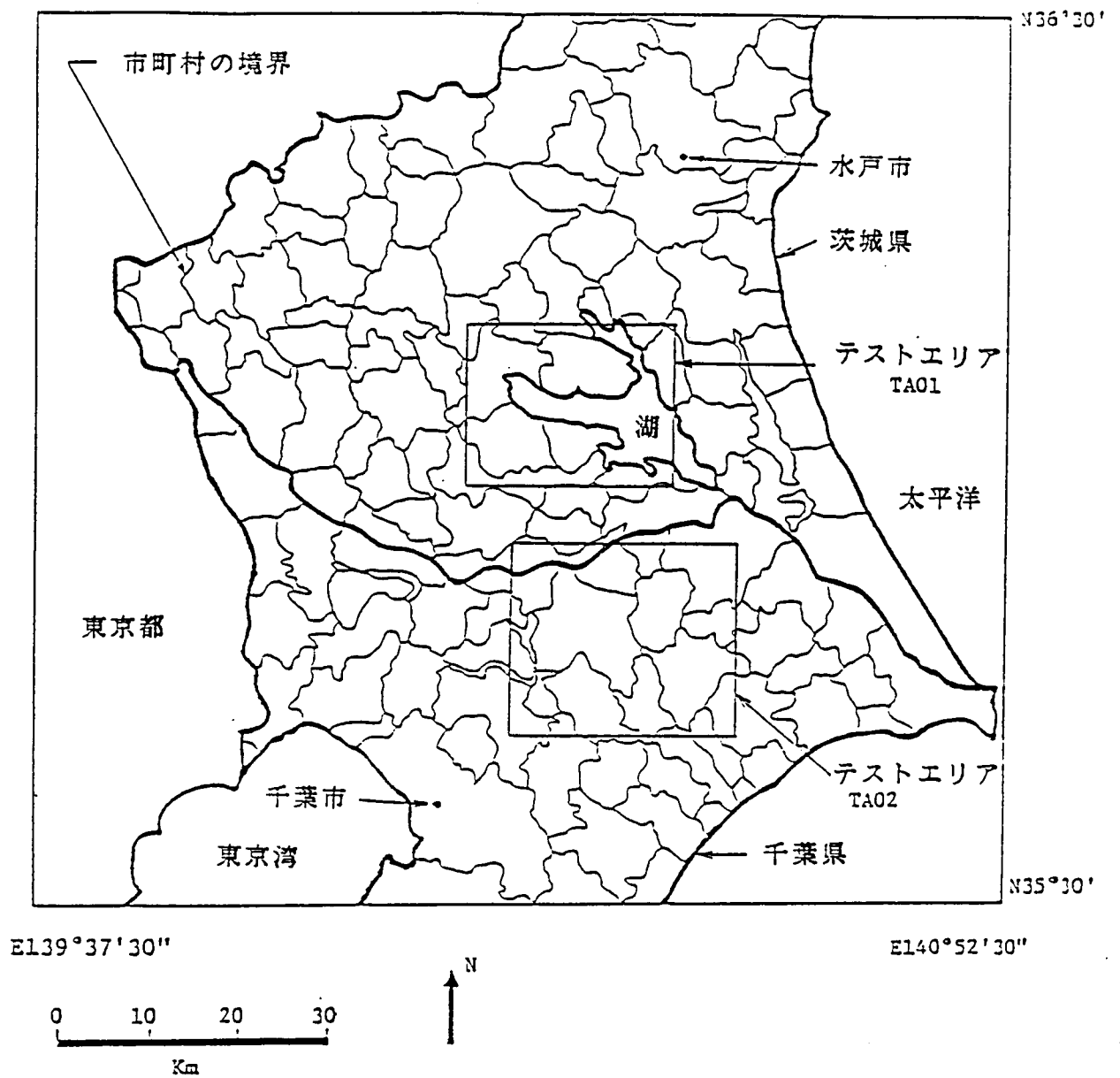


図5-1 松くい虫の被害領域抽出の対象領域

量ではなかったが、1980年になって67000m³、続いて1981年には68000m³と急激に増加しつつある。

松くい虫の被害は気温の高い夏に進行し、冬には被害木の伐倒駆除を行うのでその年の被害を調査するには、11月頃に観測されたデータを使用するのが良いと考え、1972年11月26日と1980年11月11日に対象領域を観測したランドサットMSSデータ（ランドサットシーンのパス・ロウ番号115-35）を使って、1972年から1980年にかけての松くい虫の被害領域を抽出することとした。

5.3 松くい虫の被害領域抽出手順

本研究で行った松くい虫の被害領域の抽出手順を図5-2に示す。

(1) 2時期のランドサットデータから対象領域の重ね合わせ画像を作成する。この重ね合わせ画像の作成には2.2項で述べた2段階リサンプリング法を使用した。約50点の重ね合わせ用GCPを使って誤差1画素以下で重ね合わせることが出来た。

(2) 重ね合わせ画像を使ってマルチスペクトル分類により松の領域を抽出する。

(3) 重ね合わせ画像から2時期のランドサットデータの差画像を作成する。この差画像作成には4.3項で説明した選別画素間回帰による輝度補正を行った後、差画像を作成する方法を使用した。

(4) 一方現地調査により微害、中害、激害（各被害段階の定義については5.5項参照）の各被害段階毎に代表的被害地点を数箇所ずつ選定した。図5-2のテストエリアTA01とTA02の中で重点的に調査した。又地上調査により調べられた市町村単位の年々の被害量のデータを収集した。

(5) 現地調査で選定した代表的被害地点の差画像の値を調べることにより、各被害段階毎に被害領域のランドサットデータの変化特性を調べる。

(6) (2)で抽出した松の領域の中から、被害領域のランドサットデータの変化特性に合致した部分のみを抜き出し、松くい虫の被害領域とする。

2 時期のランドサットMSSデータ

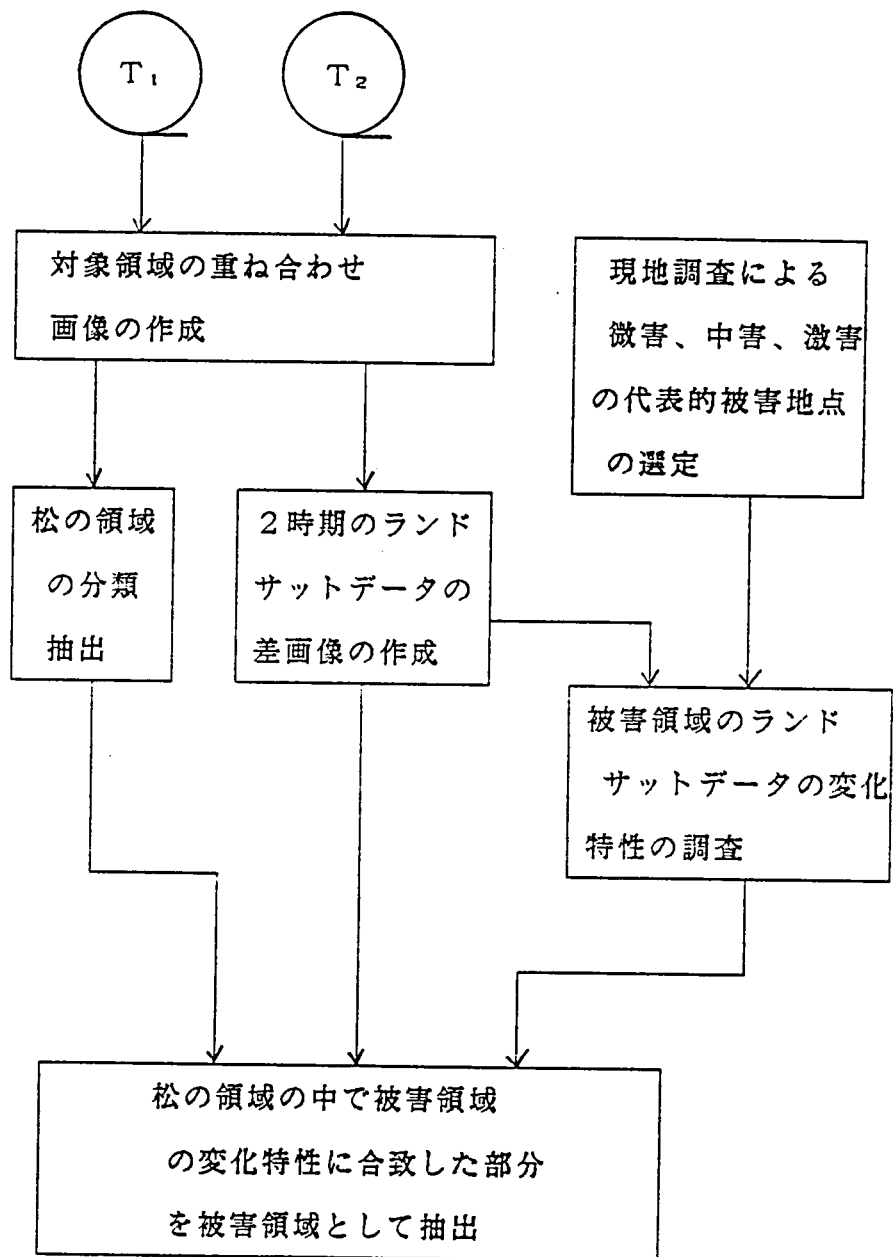


図5-2 2 時期のランドサットデータによる松くい虫の被害領域抽出手順

5.4 松の領域の抽出

重ね合わせ画像からそれぞれの時期のバンド5と6（被害によるランドサットデータの変化をこの2つのバンドで調べることにしたため）を抜き出して4バンドのデータを作成し、そのデータを使って最尤法分類により松の領域を分類抽出した。分類において設定した各カテゴリーのトレーニング領域のデータの平均値と特性をそれぞれ表5-1と図5-2に示す。厳密には松くい虫の被害領域では1980年のデータのスペクトル反射特性が変化しているわけであるが、その変化量はわずかなものであり最尤法分類において他のカテゴリーに分類されるというほどではない。図5-1を見ると松と杉・桧のカテゴリーが最も良く似た特性を示しており、表5-1から両カテゴリーの各バンドの差は1.6, 0.7, 2.2, 0.1であり両者の特徴空間でのユークリッド距離は2.8である。一方激害領域のランドサットデータの変化量は表5-3によればバンド5が+1.8, バンド6が-2.4であり、このことから被害によるランドサットデータの変化量は他のカテゴリーに分類されるほどではないということが言える。

2時期のデータを使用すると被害を受けた松の枝がすべて失くなり、枯れた幹だけが残っているような壊滅的被害領域は抽出されない可能性があるが、第3章に見るように分類精度が向上するので、2時期のデータを使用した。

5.5 松くい虫の被害によるランドサットデータの変化特性の調査

現地調査で選定した松くい虫の代表的被害地点の位置情報を基に被害によるランドサットデータの変化特性を調べた。松くい虫の被害を受けると松の葉が赤くなり活性度が低下するので、可視域の赤色帯であるランドサットMSSのバンド5と植生の活性度の良い指標である近赤外域のバンド6の値の変化を調べることにした。近赤外域にはバンド6と7があるが、バンド7は1972年のデータが6ビット（未補正のため）で、1980年のデータが7ビットになっているため、被害による小さなデータの変化を差画像により抽出する場合両方とも7ビットになっているバンド6が良いと考えた。

1972年と1980年の画像は1画素以下のずれで重なっているので、4.3項で述べた手順により選別画素間回帰による輝度補正を行った後、画素間

表5-1 松の分類抽出において設定したカテゴリーの
トレーニングデータの平均値

分類カテゴリー	1972	11/26	1980	11/11
	バンド5	バンド6	バンド5	バンド6
松	9.8	19.2	11.2	19.2
広葉樹	12.9	28.7	11.8	30.3
杉・桧	8.2	18.5	9.0	19.1
水田	17.7	21.8	19.5	23.3
草地	21.3	33.1	18.5	35.8
市街地	14.2	11.7	15.6	12.3
住宅地	17.1	18.0	17.5	17.8
裸地	27.4	27.2	27.1	27.7
河川・湖沼水	10.3	7.0	9.5	5.6
海水	7.4	4.0	10.4	5.9
畑	15.4	23.3	15.9	29.0
山影	7.0	10.7	7.6	11.7

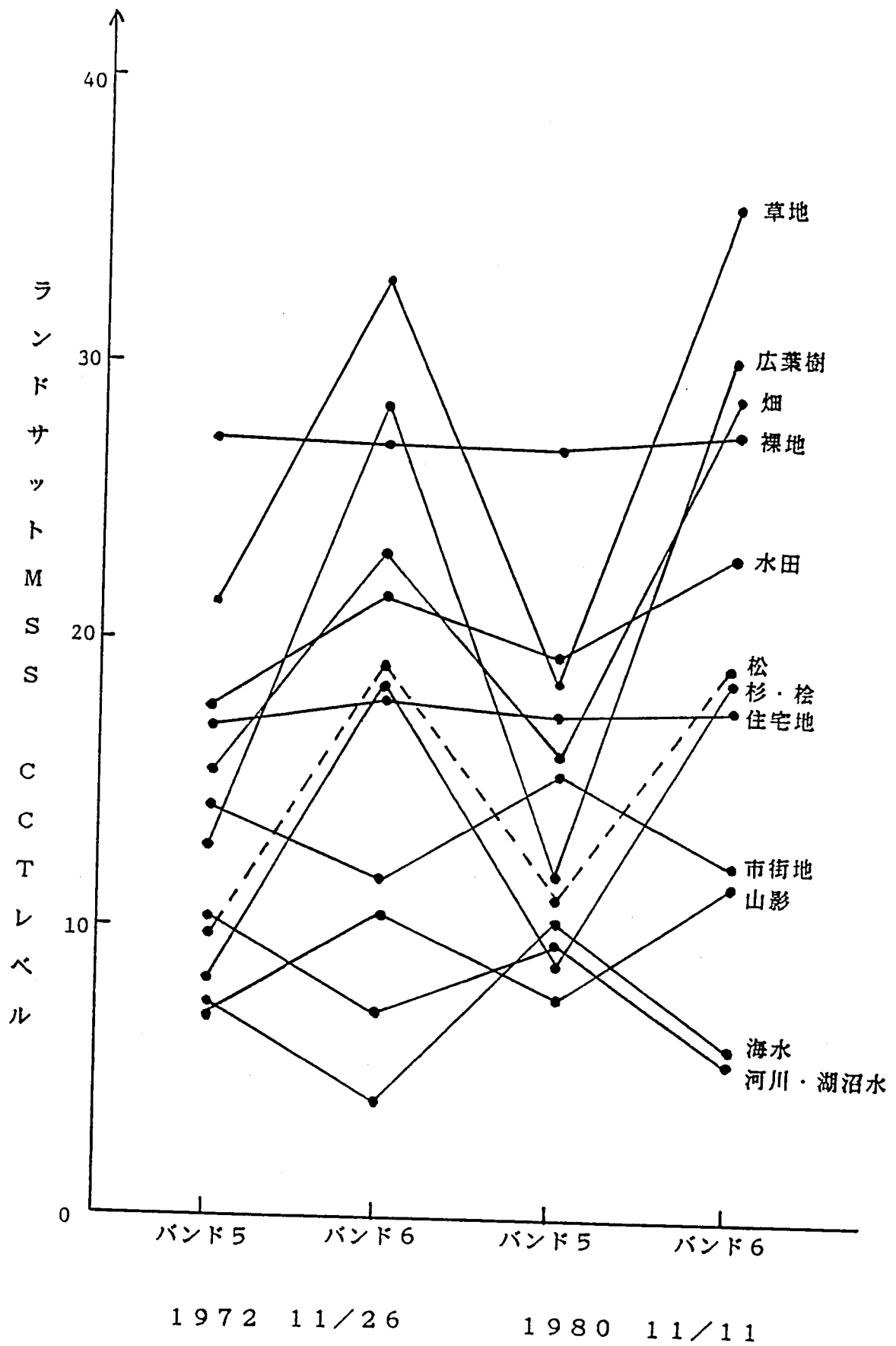


図5-3 松の分類抽出において設定したカテゴリーの
トレーニングデータの平均値の特性

の引き算を行ってバンド5と6の差画像を作成した。差画像作成の際の輝度補正は1980年の画像の輝度を1972年の画像の輝度に合わせた。最初テストエリアTA01を対象として処理を行い、その結果を対象領域全域に応用した。現地調査で選定された代表的被害地点の、差画像作成時の1972年の原画像と1980年の輝度補正画像の値を調べた。被害地点の周辺2～3画素四方の平均値を求めた。微害、中害、激害毎に選定された数箇所の被害地点の平均値を求め各被害段階毎のバンド5と6の変化特性を決定した。1980年の輝度補正画像を作成した時の回帰式の係数と回帰の残差の標準偏差 σ_e を表5-2に示す。又各被害段階の1972年の原画像の値、1980年の輝度補正画像の値、両者の差の変化量、変化量を σ_e で正規化した値を表5-3に示す。変化量を σ_e で正規化した値と各被害段階との関係を図5-4に示す。表5-3、図5-4から松くい虫の被害領域では、ランドサットMSSのバンド5の値が1.3～1.8レベル増加し、バンド6の値が1.3～2.4レベル減少しており、微害、中害、激害と被害が激しくなるに従いバンド5の増加量およびバンド6の減少量が大きくなる傾向を示していることが分かる。変化量を回帰の残差の標準偏差 σ_e で正規化した値を示しているのは、差画像が4.3.6で説明したように σ_e で正規化して作成されているためである。なお本研究における松くい虫の微害、中害、激害の被害程度の定義（林野庁による）は次の通りである。

微害：単木枯損が散見される状況で単年度の被害率が1%以下である。

中害：集団枯損が散見される状況で単年度の被害率が1～5%である。

激害：集団枯損が散見される状況で単年度の被害率が5%以上である。

5.6 松くい虫の被害領域の抽出

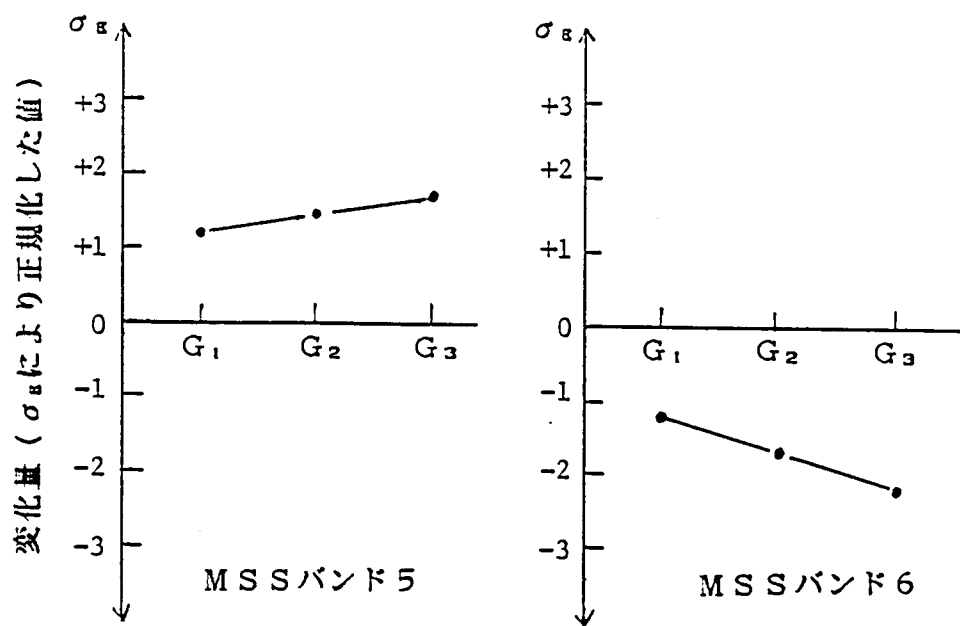
前項で抽出した松くい虫の被害領域のランドサットデータの変化特性の結果を基に、各被害段階の変化範囲を定め、その範囲に合致する部分をバンド5と6の差画像から抽出した。現地調査により松くい虫の被害状況がある程度分かっているテストエリアTA01とTA02を対象として、図5-4の結果をもとに各被害段階の変化範囲を定めて被害領域を抽出し、その結果を評価してフィードバックしながら最終的に表5-4、図5-5に示すような変化範囲を設定した。

表5-2 1980年の輝度補正画像を作成した時の
回帰係数と回帰の残差の標準偏差

ランドサット MSSのバンド	回帰式 $Y=AX+B$		残差の標準偏差 σ_E
	A	B	
5	0.830	1.463	1.062
6	0.864	1.567	1.082

表5-3 松くい虫の被害によるランドサットデータの変化

被害 段階	MSS バンド	1972年の 原画像 の値	1980年の 輝度補正 画像の値	変化量 1980年 -1972年	σ_E で 正規化 した値
微害	5	9.9	11.2	+1.3	+1.2
	6	18.7	17.4	-1.3	-1.2
中害	5	9.7	11.3	+1.6	+1.5
	6	18.8	17.0	-1.8	-1.7
激害	5	9.5	11.3	+1.8	+1.7
	6	19.1	16.7	-2.4	-2.2



G_1 : 微害、 G_2 : 中害、 G_3 : 激害

図5-4 松くい虫の被害によるランドサットデータの変化特性

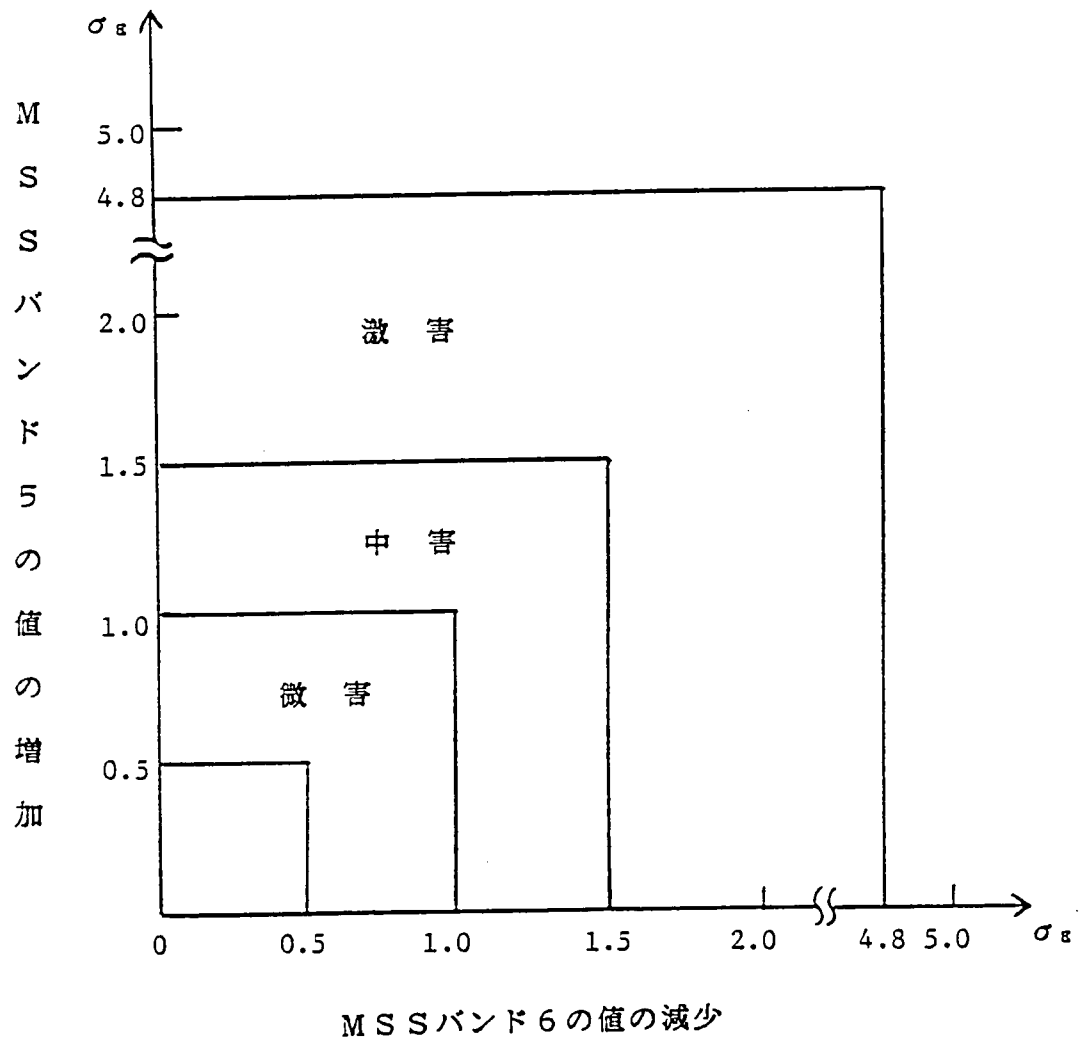


図5-5 バンド5と6の差画像から松くい虫被害によるランドサットデータの変化部分を抽出する場合の各被害段階の変化範囲

激害領域の上限を $4.8\sigma_{\text{R}}$ で切ったのは $5\sigma_{\text{R}}$ の端における異常値を避けたためである。差画像は回帰により輝度補正画像を作成したときの回帰の残差の標準偏差 σ_{R} で正規化されているので、変化範囲も σ_{R} の倍数で定めた。松の領域以外でも表5-4の変化範囲を満たす領域が多く抽出されているので、最後に先に分類抽出しておいた松の領域の中から、変化範囲を満たす領域のみを抜き出すことにより、最終的に松くい虫の被害領域を抽出した。現地調査で選定した各被害段階の代表的被害地点の写真を図5-6に示し、上の処理で抽出された松くい虫の被害領域のテストエリアTA01の部分の画像を図5-7に示す。図5-7はテストエリアTA01の部分の微害、中害、激害の領域をそれぞれシアン、黄、赤、被害なしの松の領域を黒にして、ランドサットMSSデータの疑似自然色画像（バンド5、7、4を赤、緑、青に配色）に埋め込んだものである。

表5-4 松くい虫の各被害段階のランドサットMSSデータの変化範囲

被害段階	バンド5の値の増加 "0R" バンド6の値の減少
微害	$0.5 \sim 1.0 \sigma_{\text{R}}$
中害	$1.0 \sim 1.5 \sigma_{\text{R}}$
激害	$1.5 \sim 4.8 \sigma_{\text{R}}$

5.7 被害領域の抽出結果の評価

松くい虫の被害量は毎年市町村毎に地上で目視調査により調べられており、そのデータを使ってランドサットデータにより抽出された被害領域の結果を評価した。図5-1の対象領域内に含まれている茨城県南部および千葉県北部の約120の市町村について、被害段階毎の被害領域の面積を計算した。抽出結果の画像を全国の市町村コードが100m単位のメッシュで画像化された国土数値情報と重ね合わせて計算した。各被害段階に重味を付けて次式により市町村毎の被害量を計算した。

$$X = V (C_1 S_1 + C_2 S_2 + C_3 S_3) n \quad (5-1)$$



微 害

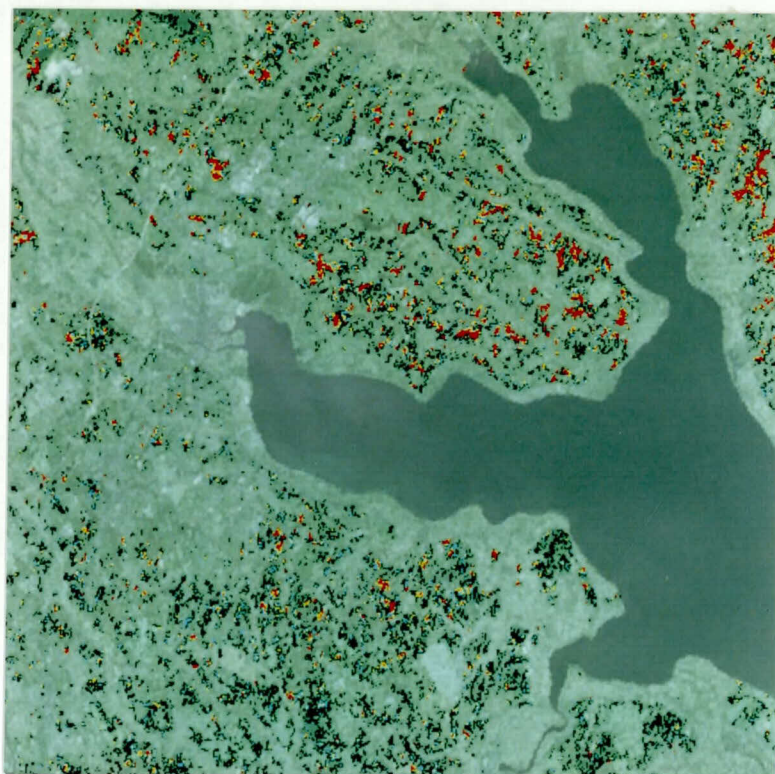


中 害



激 害

図5-6 松くい虫の各被害段階の
代表的被害地点



シアン：微害
黄：中害
赤：激害
黒：被害なしの
松の領域

図5-7 ランドサットデータにより抽出された松くい虫の被害領域
(テストエリアTA01の部分)

V : 単位面積当たりの材積量 (m^3/ha)

$C_1 \sim C_3$: 微害、中害、激害の被害率

$S_1 \sim S_3$: 市町村毎の微害、中害、激害の面積 (ha)

n : 被害抽出期間の年数

V は対象領域の松林の材積量の統計データを調べて $150 \text{ m}^3/\text{ha}$ 、 $C_1 \sim C_3$ は5.5項の各被害段階の定義からそれぞれ0.01, 0.05, 0.2, n は1972年から1980年の間の被害年数として $n=9$ (1980年を含む) とした。一方地上で調査された年々の被害量のデータを基に1972年から1980年の間の市町村毎の累積被害量を計算した。このデータとランドサットデータによる被害領域の抽出結果から(5-1)式により計算された市町村単位の被害量のデータとの間で相関分析を行ってみた。その結果を図5-8に示す。相関係数は0.824で、両者の間には高い相関係数があることを示しており、松くい虫の被害領域の抽出にランドサットデータが有効であることを示している。

5.8 今後の課題

以上の研究結果は松くい虫の被害量が非常に大きい地域を対象としており、しかも抽出期間が1972年～1980年と長期の場合である。同じ地域を対象として1981年～1982年の短期間について行ってみたが、地上調査との相関係数は良くなかった ($r=0.045$)。この場合ランドサットデータによる被害量が地上調査による結果に比べて小さい値になっていた。抽出期間が長くなればそれだけ被害領域が大きくなりランドサットデータにより抽出可能になるものと考えられる。これはランドサットMSSの地上分解能が80mであることを考慮すると当然の結果と考えられる。1本の松の樹冠の直径はせいぜい5m程度であり、このような大きさの被害木が孤立して存在するような被害程度の場合、1画素のランドサットデータの値が変化することは少ないと考えられ、このような場合検出できないわけである。しかしランドサットTMデータや、スポットデータ等のもっと地上分解能の小さなデータを使用することにより、更に小さな被害を検出することが出来るようになると考えられる。本研究で行った2時期のデータを使用する方法は

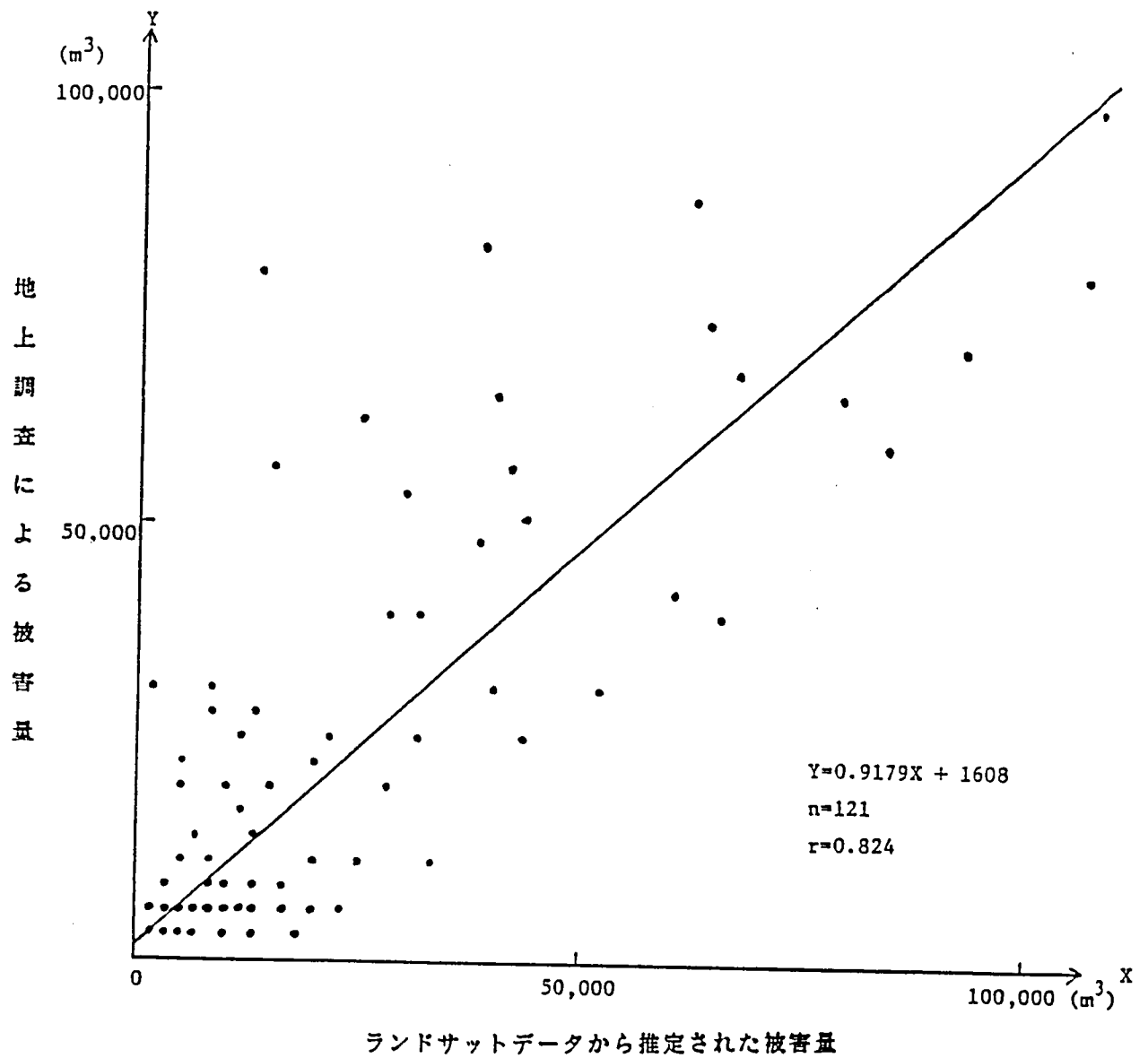


図5-8 ランドサットデータから推定された市町村単位の松くい虫の被害量と地上で調査された被害量との関係

- ・ 処理手順が複雑であること
- ・ 差画像を使って松くい虫の被害によりデータが変化した部分を抽出する方法は画像の重ね合わせ誤差などの影響を受けやすいこと

の問題点がある。

今後、もっと地上分解能の小さい1時期のデータを使って、その年の松くい虫の被害をどの程度検出できるかの研究を行う必要がある。1時期のデータを使ってその年の被害領域を抽出できれば処理手順も簡単になり、精度も良くなると考えられ、実用化される可能性がある。又年々の被害領域が分かれば変遷状況が把握でき、被害を予測することが出来るようになるであろう。

5.9 本章の要約

本章を要約すれば以下の通りである。

(1) 近年松林に松くい虫の被害が広がりつつあり深刻な問題となっている。松くい虫の被害状況の把握には、現地調査による方法以外に局部的に航空写真を使用した調査方法が採られている。これまで航空写真の松くい虫の被害調査への応用研究は行われており、赤外カラー写真が有効であり被害木の本数調査が可能だとしている。しかし航空写真による方法は広い地域の調査には時間と経費がかかり過ぎる。

(2) ランドサットデータの森林の病中害調査への応用研究としてはマイマイガ(Gypsy moth)により落葉した地域を抽出した研究があるがランドサットデータを使って松くい虫の被害を調査した研究はない。

(3) 松くい虫の被害が激しい茨城県南部と千葉県北部を含む約110km四方の広い地域を対象として、1972年と1980年に観測されたランドサットMSSデータを使ってその間に発生した松くい虫の被害領域を抽出する研究を行った。

(4) 2段階リサンプリング法により2時期のランドサットデータの重ね合わせ画像を作成し、それぞれの時期のバンド5と6のデータからなる4バンドのデータを使ってマルチスペクトル分類により松の領域を抽出した。

(5) 選別画素間回帰による輝度補正を行った後、差画像を作成し、現地調査で選定した被害地点の情報を基に松くい虫の被害によるランドサットデータの変化特性を調べた。被害領域ではバンド5の値が増加し、バンド6の値が減少し、被害が進むに従い、バンド5の値の増加量およびバンド6の値の減少量が増大する傾向を示していた。

(6) (4)で抽出した松の領域の中から、差画像を使ってバンド5の値が増加し、バンド6の値が減少した領域を抜き出すことにより松くい虫の被害領域を抽出出来ることを示した。また、バンド5の増加量とバンド6の減少量の度合いにより被害の程度を微害、中害、激害の3段階に分けた。

(7) 松くい虫の被害量は市町村単位で毎年地上で目視により調べられている。ランドサットデータによる被害領域の抽出結果から市町村単位の被害量を計算し、地上調査による被害量との相関分析を行うと両者の間には高い相関係数 ($r=0.824$) があった。しかし同じ地域を対象として1981年～1982年の短期間について行った場合相関係数は良くなかった ($r=0.045$)。

(8) 被害抽出期間が長くなればその間の被害領域も大きくなると考えられ、或る程度被害が大きくなればランドサットデータは松くい虫の被害領域抽出に有効であることを示した。ランドサットMSSの地上分解能が80mであり、1本の松の樹冠の直径が5m程度の被害木が孤立して存在する様な被害の検出は難しいと推定される。

(9) 本研究は2時期のランドサットMSSデータを使用した。もっとも地上分解能の小さい(ランドサットTMデータやスポットデータ)1時期のデータ

を使用して、その年の松くい虫の被害をどの程度検出できるかの研究を行う必要がある。1 時期のデータを使って年々の松くい虫の被害領域が抽出できれば、処理手順も簡単になり精度も向上すると考えられ、実用化される可能性がある。

第6章 異方向観測データの重ね合わせによる地表面高度の算出

6.1 序

同一地域を2つの異なった方向から観測した衛星データを使ってその地域の高度を算出することが出来る。2つの異なった方向から観測して対象の3次元情報を得る方法は古くから知られているが、1600年頃ケプラー（1591-1630）によって立体視の概念(Stereoscopy)として明確にされた⁵⁸⁾。現在地表面の高度は2つの異なった方向から観測した航空写真を人間が立体視して読み取り地形図の等高線として表現されている。図化機上に設置した航空写真を人間が左右の目でそれぞれの写真を見て両写真間の対応点を探索し、それらの写真を撮影したときの航空機の位置と姿勢を求め対応点の高度を算出している。現在、地形図上で等高線として表現されている地表面高度を、一定間隔のグリッド(X, Y)とその高度(Z)の3次元情報の形(DTM: Digital Terrain Model、数値地形モデルという)で表現する試みが盛んに行われている。高度をDTMの形で整備することにより等高線図、国土断面図、景観図等を容易に作成することが出来、国土開発事業の評価など色々な面に有用である。

航空写真から高度算出を自動的に行う研究^{59)~72)}はかなり古くから行われている。いづれも航空写真のデジタル画像を作り両画像間の対応点を自動的に探索し、高度を計算しようとするものである。高度算出の自動化は高度をDTMの形で整備するのに適している。Pantonは地勢の傾斜を予測して相関画像を変形すること、相関係数、標準偏差などによる算出高度の信頼性指標の導入、並列処理による演算時間短縮等、航空写真からDTMを自動的に作成する場合の課題について包括的に研究している⁵⁹⁾。HannahはDTM作成に関して算出高度の勾配と傾斜を調べて異常高度点を検出し補正する方法を提案している⁷⁰⁾。画像の相関に関しては多くの研究がなされており、Konecnyらは各種の自動図化機に使用されている相関法について報告している⁷¹⁾。我が国では森らが航空写真から等高線を自動描画する実験を行っている⁷²⁾。また村井ら是对応点の効率的な探索方法として画像を共役直線に沿って再配列した後、相関処理を行なう方法を提案している⁷³⁾。

衛星データによる高度算出は精度の点で航空機に及ばないが、衛星の軌道・姿勢の変動が少ないこと、観測データがデジタルの形で得られることなどの利点があり、高度の自動算出に適しており、広い地域のDTM作成に有効であると考えられ、最近衛星データによる高度算出の研究^{74)~80)}が盛んに行われている。ランドサット画像には隣接する2つのパスから観測されたサイドラップ領域が1部あり、その部分では原理的に高度算出が可能である。また軌道と直角な方向に地表面を斜めから観測する事により、高度を計測することが出来るスポット衛星²⁸⁾が1986年2月に打ち上げられている。Welchらはスカイラブとランドサットデータを使って従来の航空写真の場合と同じ光学的手法により高度算出を行ない誤差(rms)はそれぞれ150m、400mであったとしている⁷⁴⁾。Simardらは精密補正されたランドサットMSSとRBVデータを使ってある基準面に対する相対高度を計算した後、高度の分かっているGCPを使って絶対高度に変換している^{75)、76)}。2つの画像間の対応点間の距離(視差:Parallax)を単に B/H (観測時の2つの衛星間の距離(B)と高度(H)の比)で割って(6-1式参照)相対高度を求めている。対応点は相関領域を大から小の2段階に切り換えて1画素以下の精度で求めている。高度の誤差は地形図から読み取った値と比べてそれぞれ150m(MSS)、49m(RBV)であったとし、DTMから250m間隔の等高線図を作成している。EhlersらはSimardらと全く同じ方法でランドサットTMデータを使って高度を算出する研究を行い、誤差は42mであったとし、100m間隔の等高線図を作成している⁸⁰⁾。土屋らは未補正ランドサットMSSデータからGCPを使わずに高度を算出する方法を研究し、誤差の平均値は609mであったと報告している⁷⁷⁾。またスペースシャトルに搭載した航空カメラや合成開口レーダの観測データによる高度算出の研究も行われている^{78)、82)}。

通常高度算出のためには未補正データを使用することが多い。2つの方向から観測したときの視差の情報が最も良く保存されているためである。しかし未補正データから衛星の軌道と姿勢を正確に推定するには地理的位置、高度の分かっているGCPを多数必要とする。またGCPを全く使わない場合は精度が悪い⁷⁷⁾。本研究ではシステム補正データを使って地表面高度を自動的に算出

する方法を開発した^{79)~81), 83)}。

この方法は高度算出の基準面を設定し、GCPを使って基準面上で2つの観測データを重ね合わせた画像を作成して対応点を探索し、対応点観測時の衛星位置の計算にはシステム補正時に推定された衛星の軌道情報を使用する。基準面での重ね合わせのために高度が大体同じGCPを最低限3個必要とするが、未補正データを使用する場合に比べてかなり処理手順が簡単になる。また対応点と衛星の位置を地球固定座標に変換し、対応点の絶対高度を3次元的に直接計算する手順を開発した。相対高度を求めた後、高度のGCPを使って絶対高度に変換しているSimardらの方法と異なる。対応点の誤探索や雲の存在などによる異常高度点の後処理の方法についても研究した。DTM作成の演算時間短縮のために、最初粗い間隔でDTMを計算し、その値の内挿計算により細かい間隔のDTMを計算した。

スポットデータによる高度算出の研究としては村井、Konecny らが未補正写真を使って図化機により航空写真の場合と同じ方法で高度を算出する研究を行っている^{84), 85)}。本章ではシステム補正による高度算出方法、算出誤差、DTM作成結果、誤差の要因分析などについて述べる。以下本章の記述においては、基本的にランドサットTMデータを対象とした場合について述べ、SPOTデータにおいて異なる点がある場合その都度説明を加えることにする。

6.2 衛星データによる高度算出の基本原理

ランドサットデータを使ってサイドラップ領域の高度を求める基本原理を図6-1に示す。高度算出の基準面を設定し両側のパスから観測した画像を基準面において重ね合わせた画像を作成する。基準面としてはその平面内で同じ高度を持った重ね合わせのためのGCP（基準面GCP）を多数選定できる平面が望ましい。基準面で重ね合わせた2つの画像（立体視画像と呼ぶ）においては基準面からある高さ H_P にある点PはシーンLの画像では L_L の位置に、シーンRの画像では L_R の位置に観測されるので L_0 の視差が生じる。 L_0 を求めることにより高さ H_P を算出すること出来る。点Pの立体視画像間における対応点を探索し L_L と L_R を求める。次に点Pを観測した時のランドサットの位置

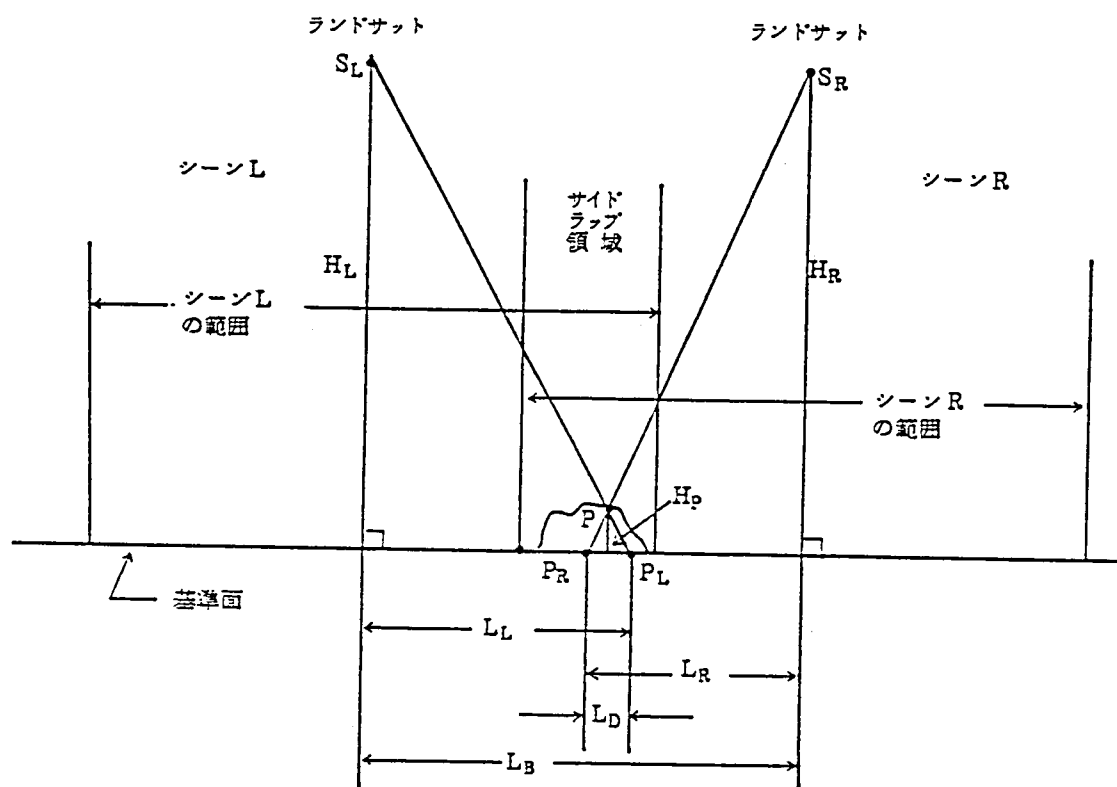


図6-1 ランドサットデータによるサイドラップ領域の高度算出の基本原理

を求めることによりランドサットの高度 H_L と H_R およびランドサットから基準面に下した垂線間の距離 L_0 が分かる。点Pの高さ H_P は次式により計算できる。

$$H_P = \frac{L_L + L_R - L_0}{L_L/H_L + L_R/H_R} \quad (6-1)$$

サイドラップ領域の幅は緯度が高くなるほど広がるが北緯 35° 付近では40～50kmであり1シーンの約 $1/4$ である。スポットデータの場合1シーン全体(60km四方)の高度を算出することが出来る。

6.3 テストサイトと対象シーンの選定

ランドサットの観測シーンのサイドラップ領域に位置し比較的大きな高度差が存在するような領域を探し、テストサイトして図6-2に示すような中央アルプスとその周辺領域を選定した。ランドサット5号の観測シーンのバスローウ108-35(長野)と109-35(飛騨)のサイドラップ領域にあり、北緯 $35^\circ 30'$ と $35^\circ 52'$ および東経 $137^\circ 30'$ と $138^\circ 0'$ によって囲まれた約45km×40kmの矩形の領域をテストサイトとした。中央アルプスの西側に木曽川、東側に天竜川が流れており、これらの川の標高はテストサイト内ではほぼ同一と見なし、この2つの川を含むような平面を想定しその平面を高度算出の基準面とした。基準面の標高は約600mであり中央アルプス山頂の平均標高約2800mとの間には約2200mの高度差がある。

高度算出のTMデータとしては次のシステム補正データを使用した。

右側観測データ 108-35(長野) 1984年12月13日

左側観測データ 109-35(飛騨) 1985年11月21日

両方のデータでは中央アルプスの山頂付近には既にかかなりの積雪があった。飛騨のシーンには右下隅の天竜川の上空に雲があった。またテストサイトの右端では飛騨のシーンのデータが少し欠落していた。

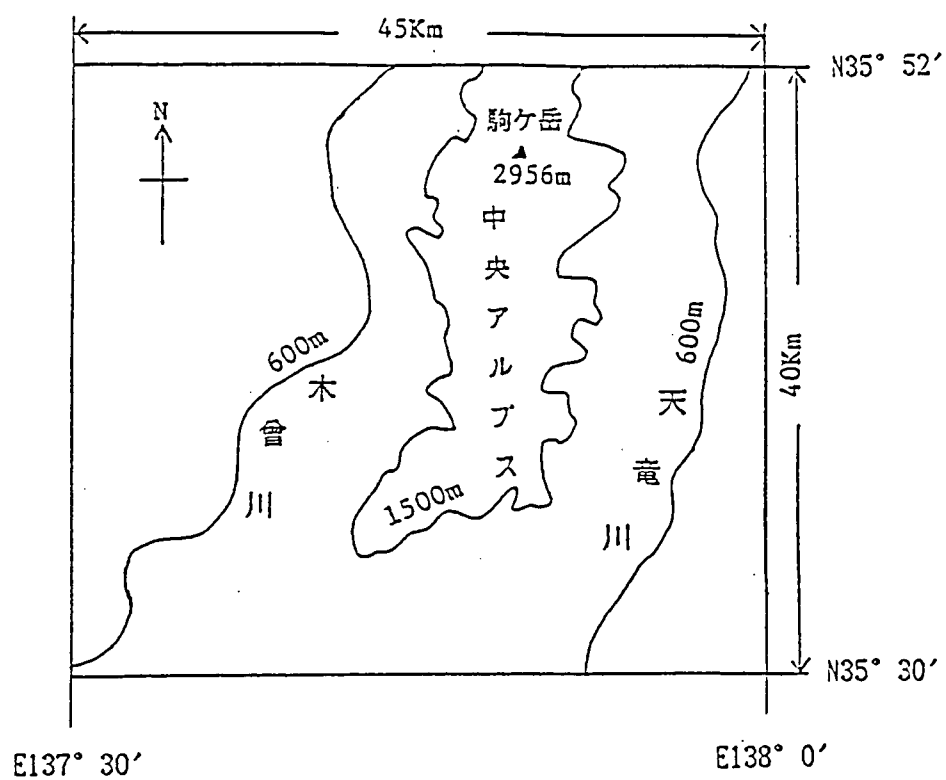


図 6 - 2 テストサイトの概要

6.4 システム補正データによる高度算出

高度算出の基本原理で説明した方法は各シーンの衛星と対応点を含む2つの鉛直平面（図6-1で直線 $S_L P_L$ を含む鉛直平面と直線 $S_R P_R$ を含む鉛直平面）が同一の平面上で重なるものとし、かつ地平面が水平であると考え場合である。実際は上の2つの鉛直平面は $2 \sim 3^\circ$ ずれておりまた地球の球面を考慮に入れなければならない3次元空間で計算する必要がある。本研究で開発したシステム補正データからの高度算出手順を図6-3に示す。

(1) 高度算出の基準面を設定し、原画像からテストサイトの部分を切出し基準面上で選定したGCPを使って左の画像を基準にして右の画像をアフィン変換して重ね合わせた立体視画像を作成する。

(2) 基準面GCPの画像座標と地図座標（緯経度座標）の測定値から最小自乗推定により各シーンの原画像の座標から緯経度座標への変換式を求める。

(3) 立体視画像において或る程度粗い間隔のメッシュの格子点（約250m間隔、1次格子点と呼ぶ）の互いに対応する点を自動探索により求める。自動探索の方法としては相関係数法を採用した。

(4) 得られた対応点の座標を原画像の座標に変換する。左の座標はそのまま切出し位置の始点座標を加算すれば良いが、右の座標は重ね合わせのために行ったアフィン変換の逆変換を行った後始点座標を加算して求める。

(5) 原画像座標に変換された対応点の座標を緯経度座標に変換する。この時に(2)で基準面GCPを使って求めておいた原画像から緯経度への変換式を使用する。

(6) それぞれの対応点を観測したときの衛星の位置（緯度、経度、高度）を計算する。この計算には原画像のTMデータをシステム補正したときに使用した衛星位置推定データを用いる。

(7) 以上の計算により高度を算出しようとする点Pの左と右の画像で観測された点 P_L 、 P_R の緯度、経度、および P_L 、 P_R を観測したときの衛星位置 S_L 、 S_R の緯度、経度、高度が得られたことになる。以上の4点を地球固定座標に変換する。地球固定座標は地球中心を原点、北極方向をZ軸、経度 0° 方向をX軸とした右手系の3次元座標である。 P_L 、 P_R を地球固定座標に変換する場

合の高度は基準面の高度（＝600 m）を使用する。

(8) 地球固定座標で直線 $S_L P_L$ と $S_R P_R$ との交点の座標を求め点 P の高度を求める。直線 $S_L P_L$ と $S_R P_R$ とは必ずしも1点で交わるとは限らないので両者の距離がもっとも短くなる点を求める。

6.5 基準面重ね合わせ画像の作成と画像座標から緯経度座標への変換式の計算

まず高度算出の基準面を選定する。図6-2のテストサイトにおいて、中央アルプスの両側を流れる木曾川と天竜川を含む平面がほぼ同一高度にあると見なして、この両側沿いに基準面 GCP を32点選定した。それらの高度を表6-1に示す。基準面の高度は600 mとした。600 mから離れている点も少し含まれている。

基準面 GCP の原画像の座標と緯経度座標を測定する。基準面 GCP の画像座標を使って、左の画像を基準として右の画像をアフィン変換して重ね合わせたテストサイト周辺部の画像を作成する。この画像は基準面で重なっていて、基準面より高度が離れている点は視差がある立体視画像となっている。

次に基準面 GCP の原画像の座標と緯経度座標の測定値から最小自乗推定により各シーンの原画像の座標から緯経度座標への変換式を求める。この変換式の求め方は、第2章の重ね合わせ画像作成において、基準 GCP を使ってシステム補正データから1次幾何補正画像を作成するための変換式の求め方と同じである（2.2.2項参照）。原画像座標と緯経度座標はUTM座標を介して関連づけられ、原画像座標とUTM座標の間の変換はアフィン変換式を使用した。

6.6 1次格子点の対応点の探索と緯経度座標への変換

立体視画像上で縦横方向に9画素間隔で選定した1次格子点（約250 m間隔）を対応予測点とし、そのまわりの部分画像のデータ間の相関係数を計算することにより対応点の自動探索を行った（図6-4参照）。右の画像から相関基準画像を切り出し、左の画像から探索画像を切り出して、相関基準画像を探索画像の上に1画素ずつずらして重ね合わせ、重なった部分の画像データ間の相関係数が最も高くなる点を対応点とした。相関基準画像の大きさは対応予

表 6 - 1 基準面の重ね合わせのために選定した G C P の高度

G C P の番号	高 度 (m)	G C P の番号	高 度 (m)	G C P の番号	高 度 (m)	G C P の番号	高 度 (m)
1	7 6 0	9	5 8 0	1 7	2 6 0	2 5	4 8 0
2	7 6 0	1 0	5 2 0	1 8	6 4 0	2 6	6 0 0
3	7 4 0	1 1	4 8 0	1 9	6 4 0	2 7	6 8 0
4	7 4 0	1 2	4 8 0	2 0	6 2 0	2 8	6 0 0
5	6 8 0	1 3	4 2 0	2 1	6 0 0	2 9	6 4 0
6	7 8 0	1 4	4 8 0	2 2	6 0 0	3 0	5 6 0
7	6 4 0	1 5	2 8 0	2 3	5 6 0	3 1	5 6 0
8	6 0 0	1 6	2 8 0	2 4	5 2 0	3 2	6 6 0

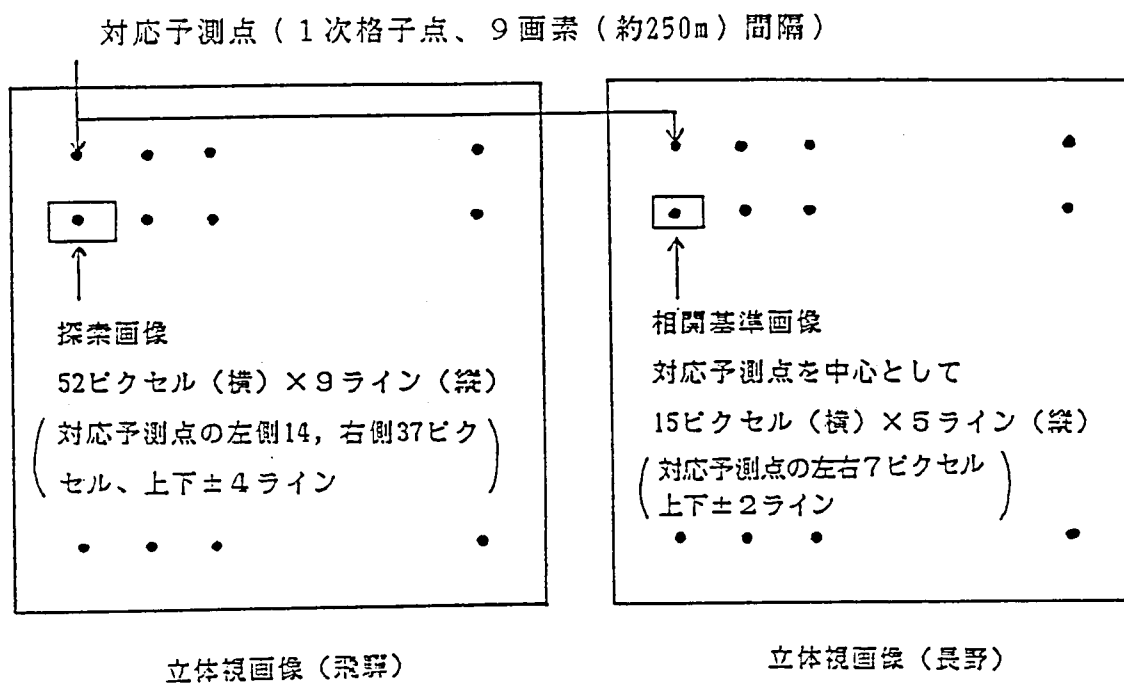


図6-4 立体視画像間の1次格子点の対応点の自動探索

測点を中心として15ピクセル（横）×5ライン（縦）とした。高度算出の精度を評価するために選定した約60点において、相関基準画像の大きさを10×3から15×9の範囲で何種類か変えて高度を算出してみたが、対応点の探索確率は15×5の場合が最も良かった。1画素28.5m四方なので約430m×140mの空間に相当する。1画素のずれは約124m（ $B/H=0.23$ として $28.5\text{m} \times 1/0.23 \approx 124\text{m}$ ）の高度差に相当し、基準面高度が600m、探索範囲の高度差が0～3000mなので探索範囲を対応予測点の左側7ピクセル、右側30ピクセル、上下±2ラインとした。探索画像の大きさは探索範囲の周囲に相関基準画像の大きさの1/2を追加した52ピクセル（横）×9ライン（縦）である。相関処理には中間赤外域のバンド5を使用した。近赤外域のバンド4でもほぼ同じ結果を示めしたが積雪領域ではバンド5の方が良い結果を示した（Ehlersらはバンド4を使用している³⁰⁾）。これは積雪領域においては、バンド4は高い反射特性を示すがバンド5は低い反射特性を示すため、バンド4の画像では飽和して濃淡が殆どなくなるのに対してバンド5の画像では濃淡がまだ残っており、対応点の探索が得られやすくなるものと考えられる。自動探索により得られた対応点の座標を原画像の座標に変換し、次に基準面GCPを使って求めておいた原画像座標から緯経度座標への変換式を使って緯経度に変換した。

6.7 対応点観測時の衛星の位置計算

衛星位置は時間の関数であり対応点を観測したときの時刻を求めて位置を計算する。

6.7.1 ランドサットTMデータの場合

(1) 対応点観測時の時刻計算

ランドサットTMは機械走査方式で16個の検知器が並列に並んでいて、1走査で16本の走査線分（走査帯と呼ぶ）を1度に観測し、フォワードおよびバックスキンの両方で信号を取得する。未補正画像の場合は各画素の観測時刻を計算することが出来るが、システム補正画像はリサンプリングされている

ので、次式によりその画素が含まれる走査帯の時刻を求め、その画素の観測時刻とする。

$$t(1) = \frac{1}{2F_s} \cdot \frac{1}{N_o} \cdot \frac{S_s}{S_u} (1 - l_o) + t_o \quad (6-2)$$

F_s : TMスキャン周波数 (=6.9986Hz)

N_o : 1スキャンの検知器の数 (=16)

S_s 、 S_u : システム補正および未補正の画像の画素の大きさ

($S_s=28.5\text{m}$ 、 $S_u=30\text{m}$)

l_o : シーンセンターのライン番号 (=2983)

t_o : 未補正画像と補正画像の場合のシーンセンター時刻の違いを補正するオフセット量でありシステム補正処理結果から得られる。

左右の対応点の原画像のライン番号を(6-2)式の1に代入して、それぞれの画素の観測時刻を計算する。

(2) 衛星位置の計算

システム補正時に使われた衛星位置推定データを使って計算した。衛星位置は時間の3次式で計算する。

$$F = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (6-3)$$

F はシーンセンター観測時の時刻を0とした各画素の観測時刻 t における推定値であり、緯度、経度、高度毎にそれぞれの値を計算するための係数 $a_0 \sim a_3$ がランドサットの地上局である地球観測センターのTMデータ補正処理結果として各シーン毎に得られる。(1)で得られた t を(6-3)式に代入して左右の対応点を観測したときのそれぞれの衛星の緯度、経度、高度が得られる。

6.7.2 スポットデータの場合

(1) 対応点観測時の時刻計算

スポットのHRVはCCDを使用したリニアアレーセンサーであり、各画素

の観測時刻は次式によりライン番号から計算する。

$$t(1) = T_L(1 - l_0) + t_0 \quad (6-4)$$

T_L : 1ライン分の観測に要する時間 (=1.504ms)

l_0 : 画像中心のライン番号

t_0 : 画像中心の観時刻

l_0 、 t_0 はCCTのヘッダーに記録されている。対応点の原画像座標のライン番号を(6-4)式の l に代入しその時の時刻を求める。

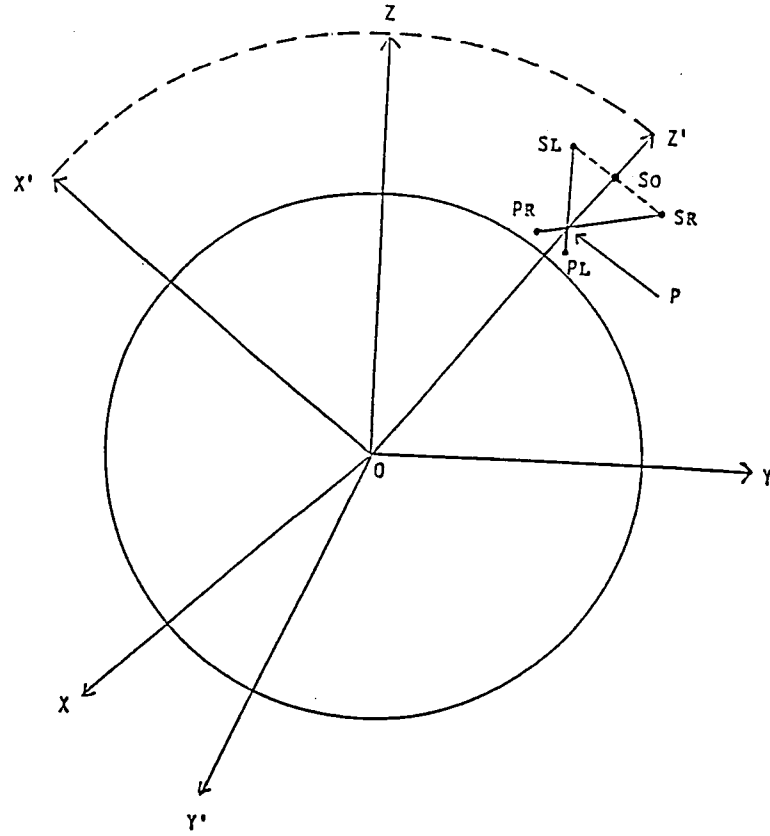
(2) 衛星位置の計算

スポットデータの場合そのシーンを観測したときの衛星の位置(地球固定座標)と時刻が1分毎に8~9点、CCTのヘッダーに記録されている。 X 、 Y 、 Z を時間の3次式で近似し、その係数を上のデータを使って最小自乗推定により求める。それらの式に(1)で得られた時刻を代入し、衛星の位置を求める。

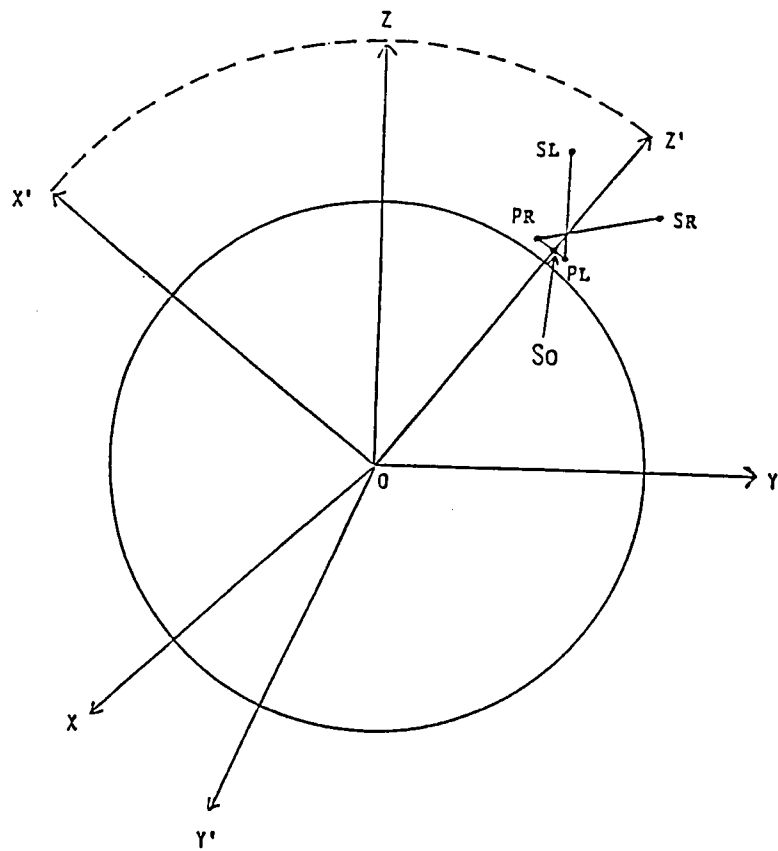
6.8 地球固定座標における高度の算出

高度算出点 P の左右のTM画像における観測点 P_L と P_R の緯経度座標と P_L 、 P_R を観測したときの衛星位置 S_L 、 S_R の緯経度および高度の値を地球固定座標に変換して点 P の高度を求める。地球を球として考えて P_L 、 P_R 、 S_L 、 S_R をXYZ座標系に変換し、直線 $S_L P_L$ と $S_R P_R$ の交点 P を求めた。2つの衛星を結ぶ直線 $S_L S_R$ の中点 S_0 を求め地球中心から S_0 の方向を Z' 軸、 Z' 軸から Z 軸を含んで 90° の方向を X' 軸とした新たな右手系の X' 、 Y' 、 Z' 座標系を考えてこの座標系で点 P を求めることにした(図6-5(a)参照)。スポットデータの場合、2つの衛星からの観測角度が大きく異なることがあるので S_0 を $P_L P_R$ の中点とした(図6-5(b)参照)。

直線 $S_L P_L$ と $S_R P_R$ および Z' 軸はほぼ同一平面内に含まれ、求めようとする点 P は Z' 軸の近くで得られると考えられる。 X' 、 Y' 、 Z' 座標における高度算出方法の説明図を図6-6に示す。 Z' 軸に垂直な平面 M を考え M と直線 $S_L P_L$ 、 $S_R P_R$ との交点 M_L 、 M_R を求め、直線 $M_L M_R$ が最も短くなる様な Z_0 を求め、 Z_0 から点 P の高度 H_P を求めた。 $Z' = Z_0$ として M_L 、 M_R の X' 、 Y'



(a) ランドサットTMデータの場合



(b) スポットデータの場合

図6-5 地球固定座標における高度の算出

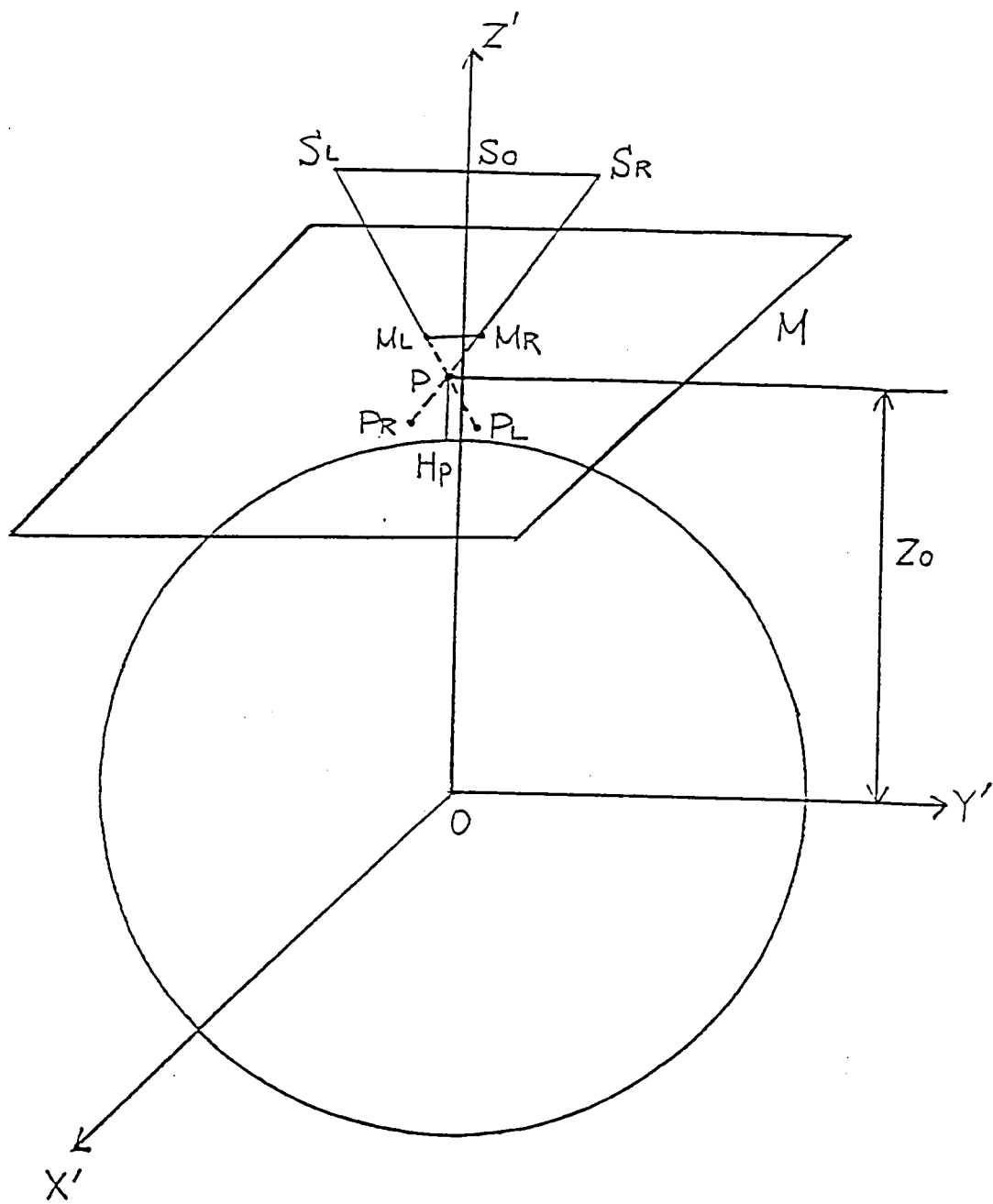


図6-6 $X' Y' Z'$ 座標における高度の算出

座標を求め $M_L M_R$ の距離を計算する。距離 $M_L M_R$ は Z_0 の関数となりこれを Z_0 で偏微分した式を0とおくことにより、距離 $M_L M_R$ が最も短くなる Z_0 を求めることが出来る。

6.9 1次格子点の高度画像の作成

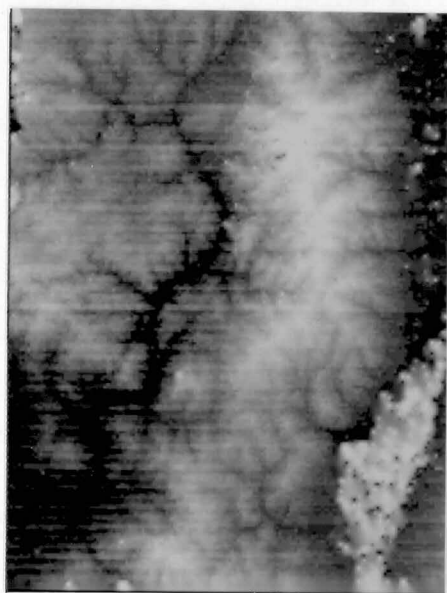
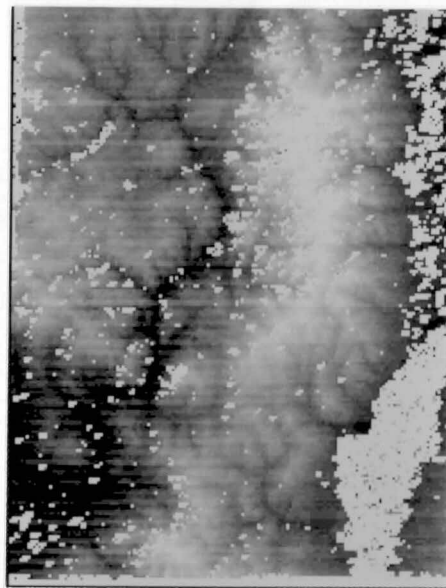
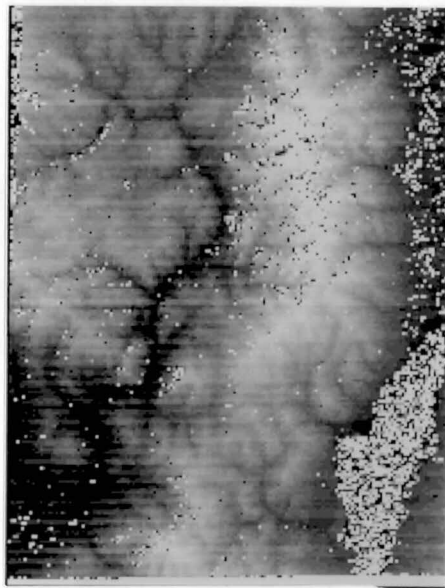
以上の手順によりテストサイトの1次格子点(約250m間隔)の高度を算出した。対応点を得られても雲、雪、影などの影響によりかなりずれた位置で対応点を得られ異常な高度が算出されている点があり1次格子点の算出結果に対して次の2つの後処理を行った。

- ・異常高度点の検出 周りの8点の平均値との差の絶対値が一定値(250mに設定)より大きい点は異常高度点とし、特定高度(=8191m設定)に置き換える。左上隅から順に処理して行き、上の3点および左の1点の中に異常高度点があれば、すでに特定高度に置き換えた状態でこのチェックを行う。
- ・特定高度点の高度置換 特定高度点の高度を特定高度以外の周りの8点の平均値で置き換える。

1次格子点の最初の算出結果の画像と上の2つの後処理を行った画像を図6-7に示す。最初の算出結果の画像において白い点として見える異常高度点が、2つの後処理により、かなり失くなっているのが分かる。右下隅で白い部分が残っているのは、この部分に立体視画像の片方に雲があったためである。異常高度点の数は約16%であった。右下隅の雲の部分がなければもっと少なくなるはずである。

6.10 2次格子点の高度算出

全体の演算時間を短縮するために一次格子点の高度データからさらに1/5の細かい間隔の格子点(2次格子点という)の高度を内挿により求めた。内挿の方法としては図6-8に示すように求めようとする点Pの近隣4×4の16点を使った3次式による内挿法を用いた⁸⁷⁾。まず1次格子点の4点 $A_1 \sim D_1$ を通る3次式を求め点Pの横方向の内挿値 E_1 を計算する。同様に $E_2 \sim E_4$ を



左上：最初の算出結果の画像

右上：異常高度点検出後の画像

左下：特定高度点の高度置換後の画像

図 6 - 7 1 次格子点の最初の算出結果の画像と後処理後の画像

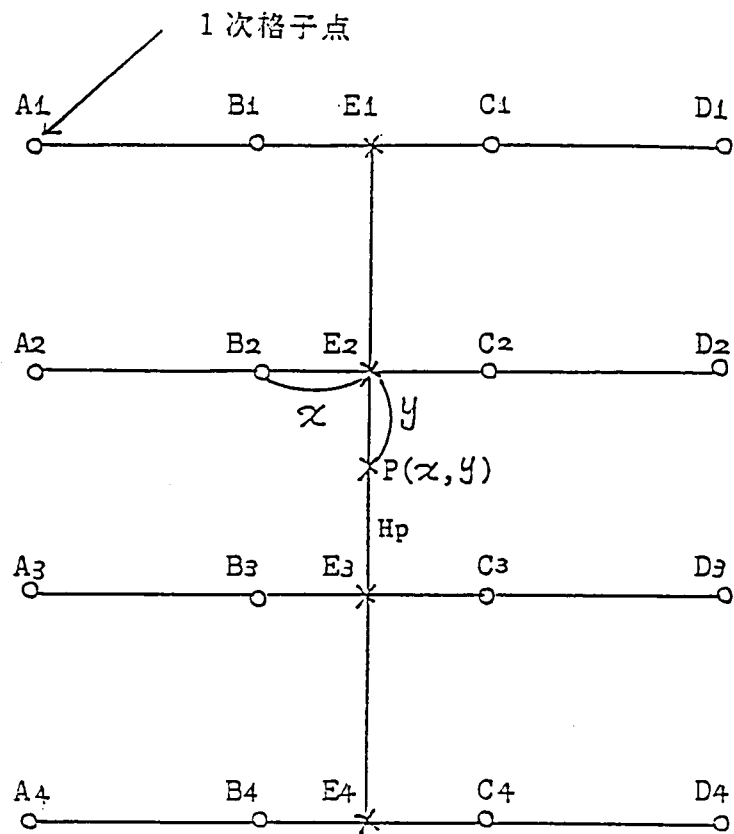


図 6 - 8 近隣 4×4 点を使った 3 次式による高度データの内挿

計算し、次に縦方向の4点 $E_1 \sim E_4$ を通る3次式を求め内挿により点Pの高度 H_p を求めた。この様にしてテストサイトの約50 m間隔の高度データの画像を作成した。

3次曲線による内挿以外に他の地形高度作成に適した内挿方法の調査研究が必要である。

6.11 高度算出評価点による算出高度の誤差

6.11.1 ランドサットTMデータの場合

立体視画像とテストサイトの5万分の1の地形図を見比べながら地形図との対応が得られ、かつ地形図から高度を読み取れるような高度算出評価点（以下評価点という）を約60点（高度250 m～3000 mの点が含まれている）選定した。評価点の立体視画像の片方の画像（長野）の座標を目視で読み取って入力し、その対応点を自動探索して高度を算出し、5万分の1の地形図から読み取った評価点の高度を真値として算出高度の誤差を調べた。又両方の画像の対応点を目視により探索し、そのデータを入力して算出した高度についても調べてみた。その結果を表6-2に示す。自動探索の場合の方法Aは対応点を1画素単位で計算した場合であり1次格子点の高度算出はこの方法によった。方法Bは相関係数の最高点とその左右どちらか高い点の2点間で0.1画素単位でBILINEARで探索画像を内挿した画像を作成し、それらの画像と相関基準画像との相関係数を計算し、さらに相関係数が高くなる点を求めた場合である。方法Cは相関係数の最高点とその左右2点の3点の相関係数の値の放物線を求めてその頂点の座標を相関係数の最高値とした場合である。これらの内挿はピクセル方向のみの1次元で行った。表6-2によればTMデータによる高度算出の誤差のrmsは117 m、誤差の絶対値の平均は99 mである。これに対して1画素以下の内挿を行うと精度は良くなり、内挿の方法としては放物線の方が少し良いことを示していて、この場合rms誤差は93 m、誤差の絶対値の平均は77 mになっている。対応点を目視により探索（1画素単位で行った）した場合のrms誤差は92 mであり、この値は本高度算出システムの誤差と考えられる。EhlersらはTMデータを使って誤差42 mと報告しているが⁸⁰⁾、

表 6-2 ランドサット TM データによる算出高度の誤差 (m)

誤 差	対応点を自動探索			対応点を 目視探索
	方法 A	方法 B	方法 C	
r m s 誤差	116.5	96.8	92.9	92.3
誤差の絶対 値の平均	98.5	80.4	76.5	76.8

評価点数 61点

方法 A : 1 画素単位で計算

方法 B : 1 画素以下をBILINEARで内挿

方法 C : 1 画素以下を放物線で内挿

これは算出した相対高度を、高度480m～920mの14点のGCPを使って最小自乗近似により絶対高度に補正した時の、他の高度480m～870mの範囲内にある7点のGCPのrms誤差の値であり、本研究の場合に比べてかなり精度評価条件が良い。Ehlersらの高度算出方法はSimardらの方法と同様に立体視画像間の視差を単に B/H で割る方法である。この方法は地球の球面を考慮しないため高度が高くなると誤差が大きくなる。本研究で使用した評価点の高度をこの方法で算出してみるとrms誤差は173mとなった。本研究による高度算出方法の方が精度が良いことを示している。

6.11.2 スポットデータの場合

富士山周辺をテストサイトとして左右から観測したスポットのシステム補正（レベル1B）データを使って以上述べた手順により高度算出を行ってみた。使用したデータは次の通りである。

329-279 1986年3月8日 衛星の直下方向から 24.1° の角度
で西側から観測 パンクロおよびマルチスペクトル

329-279 1986年3月17日 衛星の直下方向から 15.7° の角
度で東側から観測 パンクロおよびマルチスペクトル

立体視画像作成には同一高度（=420m）の3点のGCPを使用した。最初高度が260～460mの13点のGCPを使って立体視画像を作成したが精度が悪かった。スポットデータは B/H （=0.82）が大きいので基準面の傾きが高度算出の精度に大きく影響し、同一高度のGCPを3点選定することが出来れば、それを使って立体視画像を作成するのが最も良いと考えられる。ランドサットTMデータの場合と同様にテストサイトの周辺で評価点を64点選定し、算出高度の誤差を調べた。パンクロおよびマルチスペクトル画像の両方について行い、対応点の探索は目視および自動で1画素単位で求め、内挿は行わなかった。マルチスペクトルの場合バンド3を使用した。その結果を表6-3に示す。rms誤差はパンクロで30m、マルチスペクトルで39mである。自動探索の方が目視探索より良いのは真値に比べて100m以上離れている点は除外したためであると考えられる。

表 6 - 3 スポットデータによる算出高度の誤差 (m)

画 像	誤 差	目視探索	自動探索
パングロ	r m s 誤差	3 2 . 9	2 9 . 8
	誤差の絶対 値の平均	2 3 . 7	2 1 . 3
マルチ スペクトル	r m s 誤差	3 9 . 5	3 8 . 6
	誤差の絶対 値の平均	3 1 . 9	3 1 . 3

評価点数 6 4 点

算出高度の誤差は B/H に反比例し、画素サイズに比例すると考えると、TMデータとスポットデータによる誤差は次のような関係にある。

$$E(SP) = \frac{B/H(TM)}{B/H(SP)} \cdot \frac{PIXEL(SP)}{PIXEL(TM)} \cdot E(TM) \quad (6-5)$$

$B/H(TM)=0.23$, $B/H(SP)=0.82$, $PIXEL(SP)=10\text{m}$ または 20m , $PIXEL(TM)=28.5\text{m}$, $E(TM)=117\text{m}$ とすると、 $E(SP)$ はパンクロで 12m 、マルチスペクトルで 23m となり、表 6-3 の値は TM データの場合に比べて悪いということが言える。テストサイトの違い、両方の衛星の軌道・姿勢の推定精度が同じでないことなどの理由が考えられるが、スポットデータの精度は対応点の探索精度を向上させることなどによりもう少し良くなる可能性がある。また画素サイズの割にはパンクロがマルチスペクトルに比べて悪いのは、評価点として山頂が多く選定されていて、山頂に森林があるとパンクロの反射が弱くなり、対応点の探索精度が低下するためと考えられる。

6.12 地形図の等高線との重ね合わせ

ランドサット TM データを使って作成したテストサイトの 2 次格子点の高度データの画像を平滑処理した後高度 500m 間隔のカラースライス画像を作成した。平滑処理用の空間フィルタとしては $\cos^2\theta$ の関数の重味を持ったハニングフィルタを用い、フィルタの大きさは 15×15 (地表面の距離にして約 $750\text{m} \times 750\text{m}$) とした。高度データの画像にはまだスキャンラインノイズが見られる。これは TM データのフォワードスキャンとリバーススキャンの間の画像のずれの補正が完璧でないため、この部分においてずれた位置で対応点が探索されて算出高度が不連続になり、その結果発生したものと考えられる。このスキャンラインノイズを消すためと高度のカラースライス画像を滑らかにするために平滑処理を行った。

このノイズを消すためにフィルタサイズを大きくしたいがあまり大きくすると等高線が滑らかになりすぎる恐れがあり、フィルタの大きさを幾つか変えて処理を行ってその結果を検討し大きさを 15×15 とした。テストサイトの地

形図から500m間隔の等高線を抽出し、TMデータから作成した500m間隔の高度のカラーサライス画像とを重ね合わせた画像を作成した。その結果を図6-9に示す。カラーサライス画像の高度の境界線に比べて地図による等高線の方が複雑に入り組んだ形になっているが両者の位置はかなり良く合致している。カラーサライス画像は対応点探索時の基準画像が右側画像であるため、右側から観測した画像になっている。正確に地形図に重ね合わせるためには真上から見た画像に変換（正射影変換という）しなければならないが、この処理は行っていない。右下隅に高い高度の部分が算出されているのは立体視画像における雲の存在によるものである。

中央アルプスの右側の平野部において、等高線では1000m以下であるが計算高度が1000m以上となっている点がいくつか見られる。。これらの異常高度点の位置を調べてみると市街地に相当しており、市街地の部分では地形的特徴が少ないため対応点がうまく探索されず、そのため誤った高度が算出されたものと考えられる。

6.13 本高度算出システム誤差要因と各要因による算出高度の誤差

本高度算出システムの誤差の要因として次の3つが考えられる。

- ・ 対応点探索誤差
- ・ 衛星位置推定誤差
- ・ 基準面の傾き誤差

高度算出モデルを考え、そのモデルにおいて各誤差要因による算出高度の誤差を計算した。ランドサットTMデータの場合の高度算出モデルと各誤差要因による算出高度の誤差計算モデルを図6-10に示す。2つの衛星間の距離161km、衛星の高度705km、基準面の高度0m、2つの衛星の中央で基準面からの高度3kmにある点Pの高度を算出するモデル（図6-10(a)参照）を考える。この時基準面の中心点OとPとの距離は344mとなる。図6-10(a)の高度算出モデルから各誤差要因が以下に示す量 ずれた場合の算出高度の誤差を求めた。

- ・ 対応点の探索位置が1画素ずれた場合

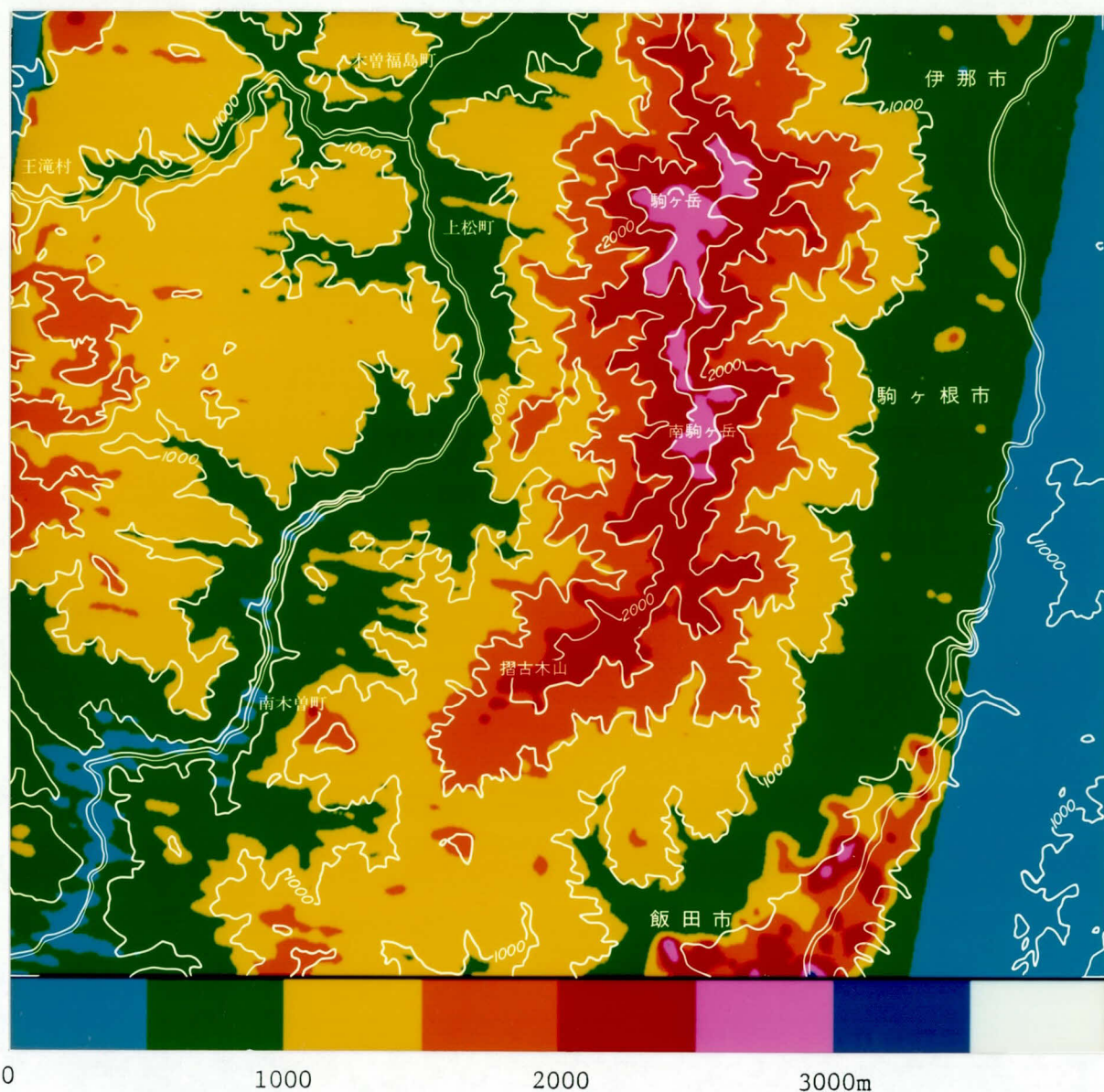
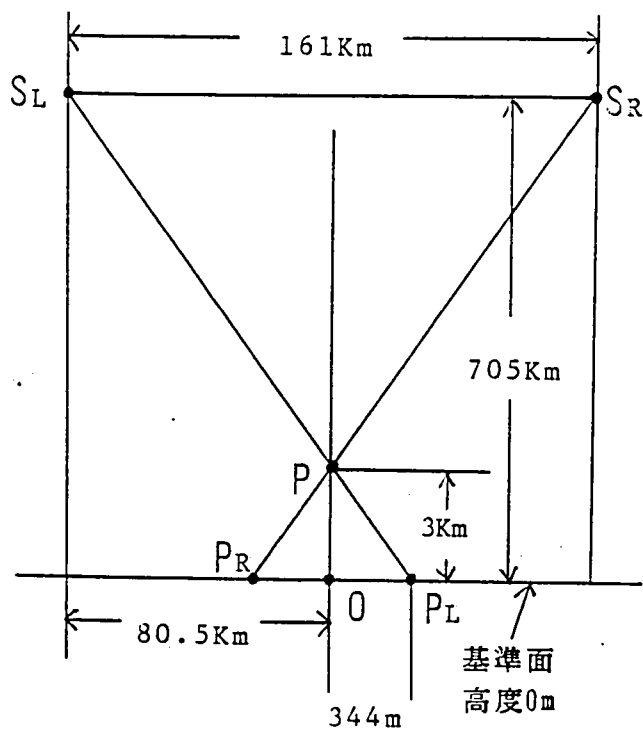
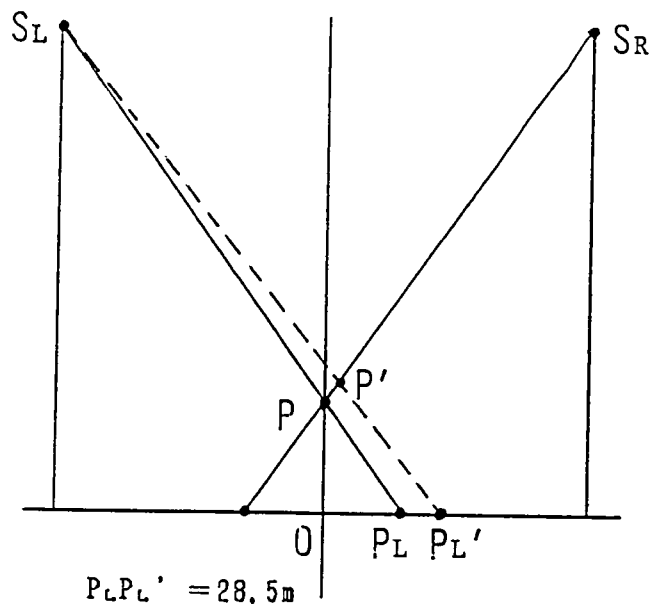


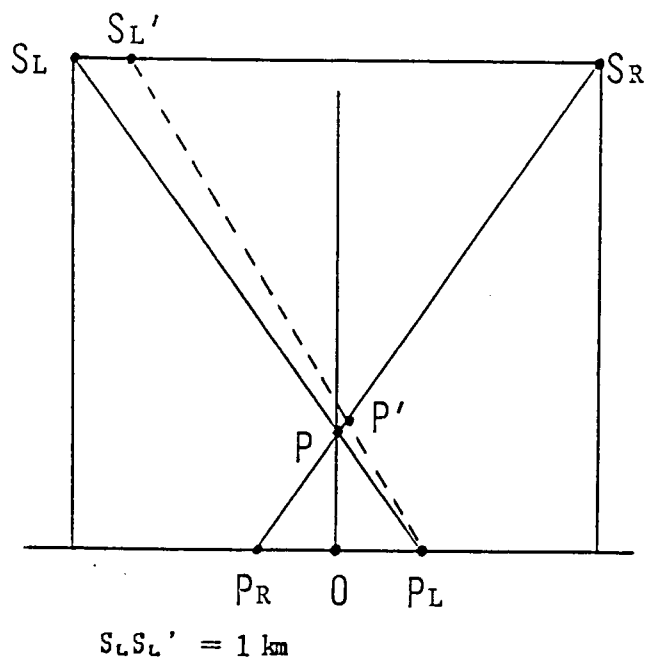
図6-9 ランドサットTMデータによる算出高度500m間隔の
カラースライス画像と地形図から抽出した等高線との
重ね合わせ



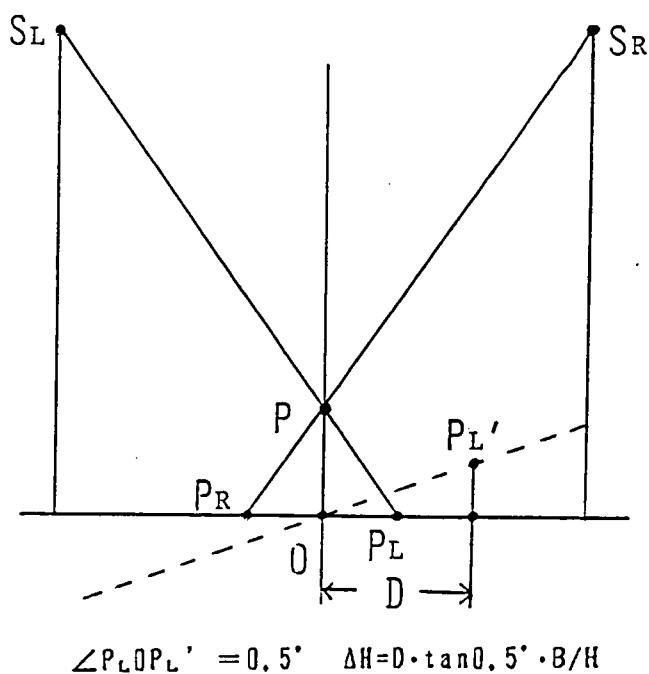
(a) 高度算出モデル



(b) 対応点の探索位置がずれた場合



(c) 衛星位置の推定がずれた場合



(d) 基準面が傾いた場合

図6-10 ランドサットTMデータの場合の高度算出モデルと
各誤差要因による算出高度の誤差計算モデル

- ・ 衛星位置の推定が軌道と直角方向に 1 km ずれた場合
- ・ 基準面が 0.5° 傾いた場合

衛星位置は推定誤差としては他に軌道方向、高度方向のずれが考えられるが高度算出に最も大きく影響するのは、高度算出の原理から見て軌道と直角方向にずれた場合である。システム補正画像の幾何歪は約 $1 \text{ km}^{21, 22, 15)}$ であることから、システム補正時の衛星位置推定誤差は 1 km 以下と考えて良い。テストサイトの大きさを 40 km 四方として基準面 G C P の高度点の変化を 200 m とした場合、基準面の傾きは 0.3° となり、 0.5° の傾きを考えて置けば十分である。表 6-4 にその結果を示す。

スポットデータの場合、使用するデータによってモデルが変わって来るが、6.11.2 に示すデータを使用した場合の衛星間の距離を求め、ランドサット TM データの場合と同じ高度算出モデルを考えた。図 6-10 (a) において衛星間の距離 683 km、衛星の高度 832 km、点 P の高度を 3 km すると O と P_L の距離は 1236 m となる。TM データの場合と全く同様に各誤差要因による算出高度の誤差を求めた。

表 6-4 の結果を見るとランドサット TM データの場合、対応点の探索誤差の要因が非常に大きく、衛星位置推定誤差、基準面傾き誤差の要因はそれほど大きくない。高度算出の精度を良くするためには立体視画像間の対応点の座標を内挿により 1 画素以下の精度で計算する必要があることが分かる。スポットデータの場合基準面傾き誤差の要因が大きく次に対応点探索誤差であり、衛星位置推定誤差の要因は小さい。

6.14 本章の要約

本章を要約すれば以下の通りである。

(1) 地表面の高度は、現在同一地域を 2 つの異なった方向から観測した航空写真を人間が立体視して読み取り地形図の等高線として表現されているが、3 次元のデジタル値の形 (DTM) で表現すると国土開発事業の評価などに非常に有用である。

表 6 - 4 各誤差要因による算出高度の誤差 (m)

誤 差 要 因	ランドサット T M データ	スポットデータ
対応点の探索位置が 1 画素ずれた場合	1 2 4	1 3 (パナクロ) 2 5 (マルチスペクトル)
衛星位置の推定が 1 km ずれた場合	1 9	5
基準面が 0.5° 傾いた 場合 (D = 1 0 km)	2 0	7 2

(2) 航空写真をデジタル化して自動的にDTMを作成する研究はかなり古くから行われている。衛星は航空機に比べ軌道・姿勢が安定しており、観測データもデジタルの形で得られるので衛星データはDTMを自動的に作成するのに適している。

(3) ランドサットデータのサイドラップ領域では隣接する2つのパスから観測したデータが得られ、スポットデータは斜め観測が可能であり、これらのデータを使って地表面の高度を算出することが出来る。SimardらはランドサットMSSの精密補正データを使って、視差と B/H による1次元の計算で相対高度のDTMを作成した後、高度のGCPを使って絶対高度に変換する研究を行っている。また土屋らは未補正ランドサットMSSデータからGCPを使わないで高度を算出しているが、精度が悪い。

(4) 本研究では、システム補正データを使って地表面の絶対高度を地球固定座標で3次元的に算出する方法を開発した。この方法は基準面の重ね合わせのために高度がほぼ等しい3点のGCPを必要とするが、衛星位置の計算にシステム補正時の衛星位置推定データを使用することにより高度算出の手順が簡単になる。

(5) 高度算出の基準となる平面を設定し、その平面内で高度がほぼ同じGCP（基準面GCP）を選び、そのGCPを使って2つの画像を重ね合わせた画像（立体視画像）を作成する。また基準面GCPを使って各画像座標と緯経度座標との関係式を求めておく。

(6) 立体視画像間の対応点を相関係数を使って自動的に探索し、対応点の画像座標を(5)で求めた関係式を使って緯経度座標に変換する。また対応点観測時の衛星位置をシステム補正時の衛星位置推定データから求める。対応点と衛星の位置を地球固定座標に変換し、各衛星とその衛星から観測した対応点を結ぶ2つの直線の間の最短距離点を求めることにより、対応点の高度を算出した。

(7) 約 60 点の評価点の算出高度の誤差 (r m s) はランドサット T M データの場合 117 m であり、対応点の探索において 1 画素以下の値を内挿して計算することにより 93 m に改善された。Simard らの方法で評価点の高度を算出し誤差を調べてみると 173 m であり、本研究で開発した高度算出方法の方が精度が良いことを示していた。またスポットデータを使った場合の算出高度の誤差は 30 m (パンクロ) および 39 m (マルチスペクトル) であった。

(8) テストサイトの D T M 作成において、先ず約 250 m 間隔の 1 次格子点の D T M を作成し、次に 1/5 の間隔の 2 次格子点の D T M を 3 次曲線を使って内挿により求めた。高度演算時間短縮の研究と共に 3 次曲線による内挿以外に他の地形高度作成に適した内挿方法の調査研究が必要である。

(9) 1 次格子点の D T M 作成において、対応点の誤探索による異常高度点の発生は避けられないが、後処理によりかなり除去出来る事を示した。先ず周りの 8 点の平均値との差が一定値以上の点を異常高度点とし、それらの高度を異常高度点以外の平均値で置き換える後処理を行った。

(10) 2 次格子点の高度の画像を平滑処理して 500 m 間隔のカラースライス画像を作成し、地形図から抽出した等高線図と重ね合わせてみると両者は良く合致していた。

(11) 高度算出の誤差の要因として、対応点探索誤差、衛星位置推定誤差、基準面傾き誤差があり、各要因による算出高度の誤差を計算した。ランドサット T M データでは対応点探索誤差の要因が非常に大きく、高度算出の精度を良くするためには対応点の座標を内挿により 1 画素以下の精度で求める必要がある事を示した。また、スポットデータの場合基準面傾き誤差の要因が大きく、基準面重ね合わせ画像作成に際して高度が同じ G C P を選定する必要がある事を示した。いずれのデータでも衛星位置推定誤差の要因による算出高度の誤差は小

さい。

(12) システム補正データによる高度算出システムはシステム補正時の衛星位置推定データを使用することにより処理手順が簡単になり、衛星位置推定誤差による算出高度の誤差も小さい。ランドサットTMのシステム補正のCCTにはシステム補正時の衛星位置推定データが記録されていないが、地形の高度計測を特長とするスポットデータのシステム補正CCTには記録されており、本研究で開発した高度算出システムはSPOTデータを使って地表面のDTMを自動的に作成するのに非常に有効である。

第7章 衛星データによる地表面高度の算出における課題の研究

7.1 序

1986年2月フランスが打ち上げた地球観測衛星スポットは観測角度を東西方向に 27° の以内で設定することが出来、この機能により地表面の高度を計測することが出来る大きな特長を持っている。また1990年代始めの打ち上げを目指して我が国が現在開発を進めている地球資源衛星(ERS-1)は光学センサー(OPS: Optical Sensor)と合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)を搭載し、OPSは直下方向と前方向の観測により地表面高度の計測機能を持つ。SARは全天候型のセンサーであり、昼と夜のデータの観測角度の違いを利用して高度を計測することが出来る。さらに衛星の姿勢を変えて観測角度の異なるデータを取得し、高度計測に役立てる計画も検討されている。Corvocoresses, Welchらは直下方向と前後方向を観測する3つのリニアアレーセンサーを搭載し、5万分の1～10万分の1の地形図作成に応用するMapsatやStereosatの提案を行っている^{38), 39)}。リニアアレーセンサーによる観測データは幾何学的歪が少なく地形図作成に便利であり、スポットHRVやERS-1のOPSはリニアアレーセンサーである。現在、5万分の1～10万分の1の地形図が作成されているのは世界の陸地の約半分に過ぎず、しかも地形図が年々更新されているのは陸地のわずか1%である⁴⁰⁾。衛星データを使って地表面高度を自動的に算出することが出来れば、未だ地形図のない地域の地形図作成や、地形図の更新に非常に有効な手段となる。

第6章で述べた高度算出方法を将来衛星データによる地形図作成に応用するためには次の様な課題がある。

- (1) 立体視画像間の対応点の誤探索により異常高度点が発生する。
- (2) 基準面の重ね合わせのために高度がほぼ同じGCPを選定する必要がある。
- (3) 高度算出のためのコンピュータの演算時間が長い。

(1)の対応点の誤探索による異常高度点発生の問題は最も重要な課題であり、航空写真による地形図自動作成の研究の時代から多くの研究がなされている。Pantonは対応点探索時の相関係数や相関領域の標準偏差等から信頼性指標を計

算し、高度算出結果に付与しておき、算出高度の後処理などに利用することを提案している⁹⁰⁾。Simard, Ehlersらは相関領域を大から小の2段階に切り換えることにより異常高度点が算出される確率が少ないとしている^{75)、88)}。また森らは大きさと共に格子点の密度も変えて大から小の3段階に切り換える方法を提案している⁹¹⁾。本研究ではこの問題に対して

- ・異常高度点が発生しやすい点の画像の統計的特徴の調査
- ・異常高度点の発生確率と相関領域の画像の大きさの関係の調査

を行ない、異常高度点を少なくする高度算出方法を開発した。高度算出に際し相関基準画像の分散を調べ、相関領域を小から大の2段階に切り換えることにより異常高度点を少なくすることが出来ることを示した。

(2)の基準面GCPの選定の問題については、実用化の場合高度がほぼ同じのGCPを選定することは難しいと考えられる。基準面重ね合わせの処理においてGCPの高度を考慮することにより、異なった高度のGCPを選定しても良い方法を研究した⁹²⁾。基準面傾き誤差が算出高度に大きく影響するスポットデータを使用してこの方法による算出高度の誤差を調べた。

(3)の演算時間の問題に対しては、先ず元の画像を平滑処理した画像を使って高度を算出し、次にその値を使って探索領域を狭めて高度を算出する2段階処理方式により演算時間を1/3程度に短縮できた⁹²⁾。Pantonはこの問題に対してParallel processor方式を提案している⁹⁰⁾。本章では上の(1)、(2)の課題についての研究結果を述べる。

7.2 異常高度点の対応策の研究

7.2.1 研究手順

異常高度点の対応策の研究手順を図7-1に示す。

(1)衛星データによる高度算出結果の画像において異常高度点が発生している周辺の立体視画像の地形特徴を調査する。

(2)異常高度点の周辺において対応策の研究を進め行くためのテストポイントを多数選定する。異常高度点と正常高度点がほぼ等しくなるように選定する。

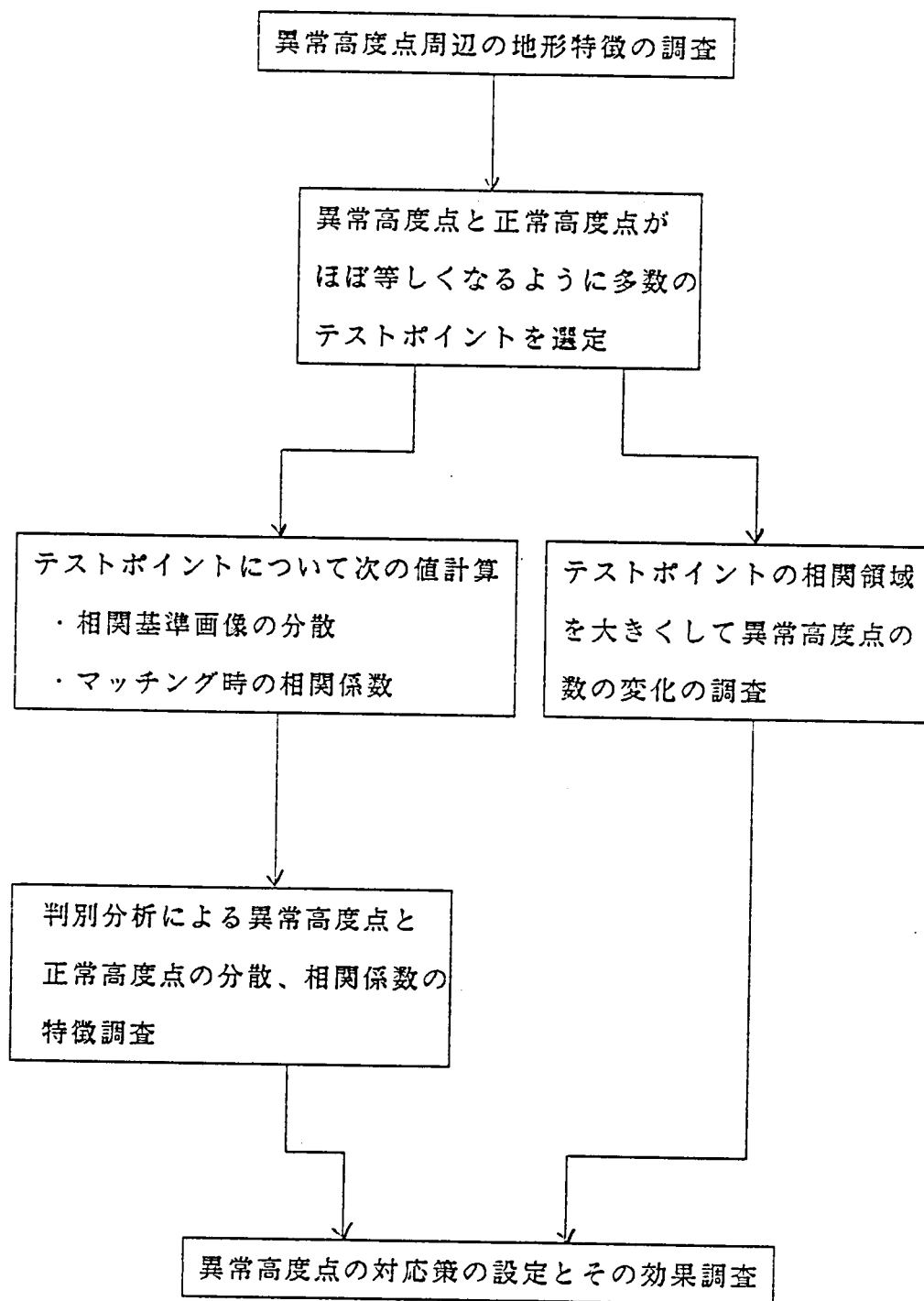


図 7 - 1 異常高度点の対応策研究手順

(3) テストポイントの相関基準画像（探索の場合の基準となる画像）の分散および対応点探索におけるマッチング時の相関係数を計算する。

(4) 相関基準画像の分散およびマッチング時の相関係数について、判別分析により異常高度点と正常高度点の各グループ毎の特徴を調査する。

(5) テストポイントの相関領域を大きくして対応点の探索を行って高度を算出し、異常高度点の数の変化を調べ、相関領域を大きくすることの効果を見る。

(6) 判別分析の結果および相関領域を大きくした場合の調査結果を基に異常高度点の対応策を設定し、その効果を調べる。

7.2.2 異常高度点の画像の地形特徴の調査

ランドサットTMデータによる算出高度の画像と等高線との重ね合わせ画像（図6-9）を見ながら、異常高度点と思われる点を抽出し、その点の約1km四方の周辺の立体視画像の拡大画像を作成し、それらの点の地形特徴を調べてみた。24点選定したが、それらの地形特徴と異常高度点発生の原因をまとめたものを表7-1に示す。異常高度点の発生しやすい場所としては市街地と山影が多い。市街地は際だった地形特徴がないため、また山影は輝度が低いためと推定される。地形特徴が少ない領域としては他に水域、草原、一様な森林などが考えられるが、この場合のテストサイトには含まれていなかったもので異常高度点として抽出されなかったものと推定される。山影の部分は輝度が低いため異常高度点発生の原因となるが、山影の周辺部ではマッチングが得られやすくなる利点がある。しかし2つの観測データの時期が異なると山影の位置が変わって来るため異常高度点発生の原因となる。

7.2.3 テストポイントの選定

異常高度点発生の大きな原因である地形特徴が少ない場合について研究するために、市街地の周辺でテストポイント選定した。第6章の研究で行った衛星データによる高度算出結果の画像を使って次の要領でテストポイントを選定した。

表 7-1 異常高度点周辺の地形特徴と異常高度点発生の原因

番号	地形特徴、原因	番号	地形特徴、原因
1	市街地、河の流れの変更	13	市街地、地形特徴なし
2	市街地、地形特徴なし	14	市街地、地形特徴なし
3	市街地、地形特徴なし	15	市街地、地形特徴なし
4	市街地、地形特徴なし	16	山の森林、パターン複雑
5	山影、輝度低い	17	積雪状態の違い
6	山影、輝度低い	18	山影、輝度低い
7	湖畔、陸水界の形変化	19	山影、影の形の違い
8	山影、輝度低い	20	山影、輝度低い
9	山影、輝度低い	21	山の森林、パターン複雑
10	山影、影の形の違い	22	山影、輝度低い
11	市街地、地形特徴なし	23	山影、影の形が複雑
12	市街地、地形特徴なし	24	市街地、河の形の変化

- (1) 異常高度点が多く発生している付近の1次格子点の算出高度を調べ、異常高度点と正常高度点がほぼ等しく混在している様な5×5点の一次格子点をテストポイントとして選定した。
- (2) (1)の様なテストポイントの集合点を5点選定し、合計125点のテストポイントを選定した。
- (3) ランドサットTMデータおよびスポットのマルチスペクトルデータの場合についてそれぞれ125点ずつ選定した。1次格子点の間隔はランドサットTMデータで約250m、スポットデータで200mなので、1つのテストポイントの集合点の大きさはそれぞれ約1.25km四方および1km四方である。
- (4) 異常高度点と正常高度点の判別は選定したテストポイントの集合点の高度を地形図から調べ、その高度の±200mの範囲内を正常高度点、それ以外の高度を異常高度点とした。市街地周辺を選定したので1つのテストポイントの集合点では同じ高度と見なすことが出来る。

以上のようにして選定したテストポイントの集合点毎の異常高度点と正常高度点の数を表7-2に示す。合計でランドサットTMデータの場合で異常高度点58点、正常高度点67点、スポットデータの場合でそれぞれ50点（異常）と75点（正常）選んだ。少し異常高度点の数が少ない。なおこのテストポイントを選定した場合の1次格子点の高度算出の際の相関領域の大きさは次の通りである。

ランドサットTMデータ 15ピクセル×5ライン

(427.5m×142.5m、1画素28.5m四方)

スポットデータ 15ピクセル×15ライン

(300m×300m、1画素20m四方)

ランドサットTMデータにおいて選定した1つのテストポイントの集合点TM2の5×5点の算出高度の結果を図7-2に示す。この点の高度を地形図より読み取ると約700mであったので500m～900mの範囲を正常高度点とし、それ以外の範囲を異常高度点とした。TM2では図7-2の太線で囲んだ13点を異常高度点と判別した。図7-3にTM2の周辺部128×128画素（約1.3km四方）の部分の立体視画像および、TM2の中で代表的な異

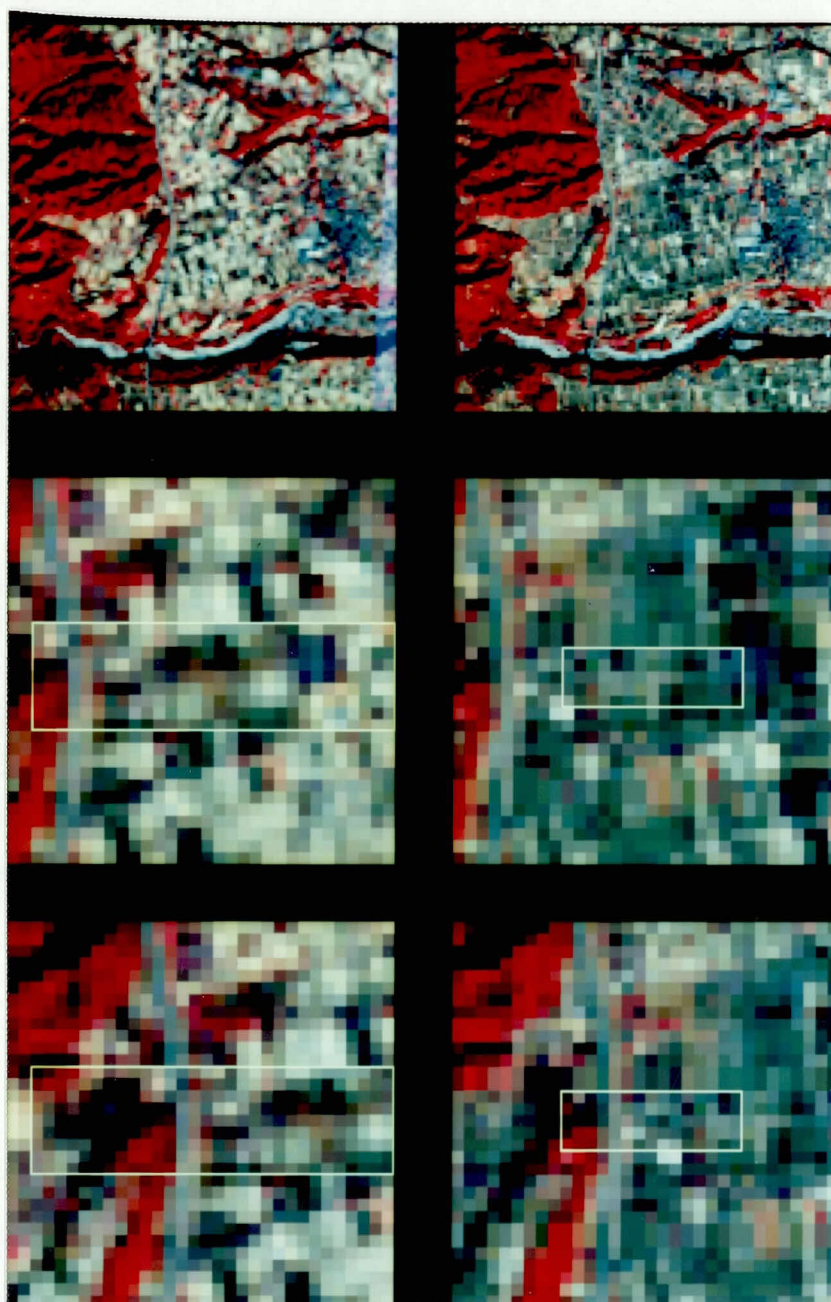
表7-2 ランドサットTMデータおよびスポットデータの場合の
選定したテストポイントの異常／正常高度点の数

T M デ ー タ	テストポイント集合点	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	合計
	異常高度点	9	13	12	8	16	58
	正常高度点	16	12	13	17	9	67
ス ポ ッ ト デ ー タ	テストポイント集合点	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4	SP 5	合計
	異常高度点	9	6	11	13	11	50
	正常高度点	16	19	14	12	14	75

6 7 4	6 7 3	6 7 2	6 7 1	6 6 9
7 9 8	3 3 8 6	3 8 8 5	3 6 3 7	9 1 8
6 7 4	6 7 3	3 5 1 5	4 2 3	4 2 2
7 9 8	3 6 4 0	3 6 3 8	9 1 9	4 2 5 1
7 9 8	7 1 7	7 9 6	3 3 9 0	4 1 2 8

正常高度 500 m～900 m

図7-2 テストポイントの集合点TM2の
5×5点の算出高度(m)。
太線で囲まれた13点を
異常高度点と判別した。



上段：周辺部（ 128×128 画素）

中段：異常高度点が算出された点（ 32×32 画素）

下段：正常高度点が算出された点（ 32×32 画素）

右側白枠：相関基準領域、左側白枠：探索領域の一部

図7-3 テストポイントの集合点T M 2の周辺部および
異常／正常高度点が算出された点の立体視画像

常／正常高度点が算出された点の 32×32 画素（約 900 m 四方）の部分の立体視画像を示す。相関領域が $15\text{ ピクセル} \times 5\text{ ライン}$ の場合の相関基準領域（右側）と探索領域の1部（左側）を白枠で示す。正常高度点の場合の相関基準領域を見ると左端に森林の1部がひっかかっている（下段右の画像参照）が、異常高度点の場合は市街地だけで特別な地形特徴がない（中段右の画像参照）のが分かる。相関基準領域内の画像の特徴を調べることで異常高度点が算出される可能性を予測することが出来る事を示唆している。

7.2.4 判別分析による異常／正常高度点の相関領域の画像の特徴調査

(1) 判別分析

判別分析とは多変量解析技術の1つであり幾つかの群に属する観測値があった場合、それらを最も誤判別の少ない形でそれぞれの群に判別する関数を見出し、新しい観測値が与えられた場合その判別関数を使ってどれかの群に判別する。判別関数として線形判別関数を用いる場合について説明する。

P 次元の変量 x_1, \dots, x_p が2群の標本について観測されているとする。次のような線形判別関数

$$z = a_1 x_1 + \dots + a_p x_p \quad (7-1)$$

を考え、観測されている2群のデータを”最も良く判別するように”係数 a_1, \dots, a_p を定める²³⁾。線形判別の考え方を図7-4に示す。

$z_i^{(k)}$ の変動を表す平方和は次のように分解される。

$$\underbrace{\sum_{k=1}^2 \cdot \sum_{i=1}^{n_k} (z_i^{(k)} - \bar{z})^2}_{\text{総平方和 } S_T} = \underbrace{\sum_{k=1}^2 n_k (\bar{z}^{(k)} - \bar{z})^2}_{\text{群間平方和 } S_B} + \underbrace{\sum_{k=1}^2 \cdot \sum_{i=1}^{n_k} (z_i^{(k)} - \bar{z}^{(k)})^2}_{\text{群内平方和 } S_H} \quad (7-2)$$

ただし $\bar{z}^{(k)}$ は第 k 群の平均、 \bar{z} は全体の平均を表す。群間平方和 S_B の総平方和 S_T に対する比 $\eta^2 = S_B / S_T$ を最大にすることが”2つの群を最も良く判別する”ことと定義し、 η^2 を最大にするように係数 a_1, \dots, a_p を

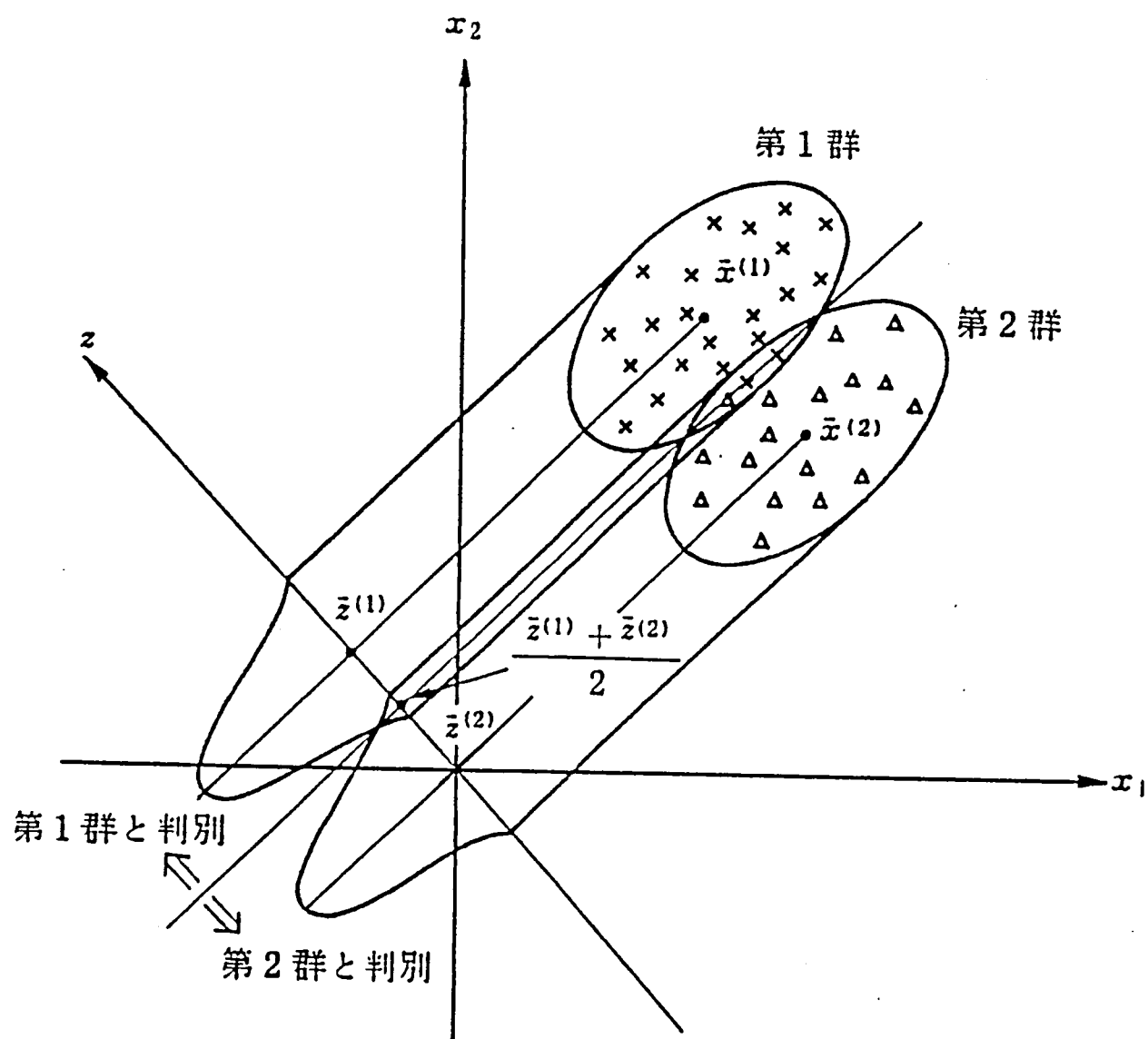


図7-4 線形判別の考え方（文献⁹³⁾、pp.73 図4.1より転写）

定める。図7-4において2群の平均間の標準化距離を最大にする事に相当する⁹³⁾。判別の分点としては両群の平均($\bar{x}^{(1)}$ 、 $\bar{x}^{(2)}$)に対応する $\bar{z}^{(1)}$ 、 $\bar{z}^{(2)}$ の中点を用いるのが簡便である。両群の母集団の分布が多変量正規分布をしているとすれば群をカテゴリー、群に属する観測値をトレーニング領域のデータと考えれば3.3項で説明した最尤法分類と同じである。

(2) 判別分析の結果

選定したテストポイントの高度算出時の次の2つの項目について判別分析を行った。

- ・ 相関基準画像の分散

- ・ 探索を行った場合のマッチング時の相関係数

ランドサットTMデータおよびスポットデータの場合の判別分析の結果を表7-3、7-4に示す。ランドサットTMデータの相関基準画像の分散についてみれば、異常高度点58点の中51点(87.9%)が異常群に、正常高度点67点の中39点(58.2%)が正常群に判別されたことを示している。これらの表から次の事が言える。

(i) 相関基準画像の分散については異常群の判別率はかなり高いが、正常群の判別率はそれほど高くない。特にスポットデータの正常群の判別率はかなり低い。これは次の事を示している。相関基準画像の分散を調べることにより、異常高度が算出される可能性はかなり高い確率で予測できる。しかし分散の値は正常高度が算出される可能性を示しているが、算出された高度の中には異常高度が含まれている割合はかなりある。分散の値は異常群の方が小さい。

(ii) マッチング時の相関係数についてランドサットTMデータおよびスポットデータとも異常群および正常群の判別率はかなり高い。この事は相関係数を調べる事により、算出高度が異常であるか正常であるかをかなり高い確率で判別することが出来ることを示している。相関係数の値は異常群の方が小さい。

表 7-3 ランドサット T M データの場合の分散および
相関係数の判別分析の結果

項目	群	点数	判別マトリクス		判別率 %	平均値
			異常	正常		
分散	異常	58	51	7	87.9	57.4
	正常	67	28	39	58.2	106.3
相関 係数	異常	58	52	6	89.7	0.472
	正常	67	18	49	73.1	0.727

テストポイント点数 125点

表 7-4 スポットデータの場合の分散および
相関係数の判別分析の結果

項目	群	点数	判別マトリクス		判別率 %	平均値
			異常	正常		
分散	異常	50	34	16	68.0	19.6
	正常	75	48	27	36.0	21.5
相関 係数	異常	50	39	11	78.0	0.448
	正常	75	19	56	74.7	0.601

テストポイント点数 125点

(iii) 異常であるか正常であるかの判別は異常高度点の判別の方が確率が高い。

(iv) ランドサットTMデータとスポットデータではランドサットTMデータの方が判別率が高い。異常群と正常群の分散の平均値はランドサットTMデータでは57.4と106.3でかなり差があるが、スポットデータでは19.6と21.5でそれほど差がない。ランドサットTMデータの方が瞬時視野が大きいためS/Nが大きくなり、ダイナミックレンジの広いデータが得られているためであると考えられる。

7.2.5 相関領域を大きくした場合の効果の調査

立体視画像間の探索において、相関基準画像の中に地形特徴のあるものが含まれていない場合、異常高度点が算出される確率が高い。相関基準画像を大きくすることにより、地形特徴のあるものが含まれる確率が高くなって、異常高度点が算出される確率が低くなると推定される。相関領域を基本の大きさ(15×5および15×15)から以下のように2段階広くして、テストポイントの高度を算出し、異常高度点の数を調べた。

	ランドサットTMデータ	スポットデータ
	ピクセル×ライン	ピクセル×ライン
基本の大きさ	15×5	15×15
サイズ1	23×5	23×15
サイズ2	31×5	30×15

サイズ1、サイズ2は基本の大きさから横の方向に1.5倍、2倍と広くし、探索範囲は変わらないようにした。異常高度点の判定は7.2.3(4)と同じである。各テストポイントの集合点毎および合計の異常高度点の数を表7-5に示す。相関領域を大きくすることにより、異常高度点の数はランドサットTMデータの場合58→44→37へ、スポットデータの場合50→33→19へと少なくなっていることが分かる。各テストポイントの集合点により少なくなり方が違うのは、各集合点周辺の地形特徴が少し異なるからであると考えられる。

表 7-5 相関領域の大きさを変えた場合の異常高度点の数

T M デ タ	相関領域	テストポイント集合点					合計
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	
	15×5	9	13	12	8	16	58
	23×5	9	7	10	3	15	44
	31×5	7	5	9	2	14	37
ス ボ ッ デ ト タ	相関領域	テストポイント集合点					合計
		SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	
	15×15	9	6	11	13	11	50
	23×15	9	5	4	7	8	33
	31×15	7	3	3	4	2	19

7.2.6 分散と相関係数による異常高度点対策

相関基準画像の分散とマッチング時の相関係数を調べることにより、図7-5に示すような異常高度点対策を含んだ高度算出フローチャートを考えた。

(1) 立体視画像間の対応点の探索を行う前に基本相関領域の相関基準画像の分散がある設定値 (V_{TH}) 以上かどうかを調べる。

(2) 分散が V_{TH} 以上ならば基本相関領域で相関係数法により対応点を探索する。

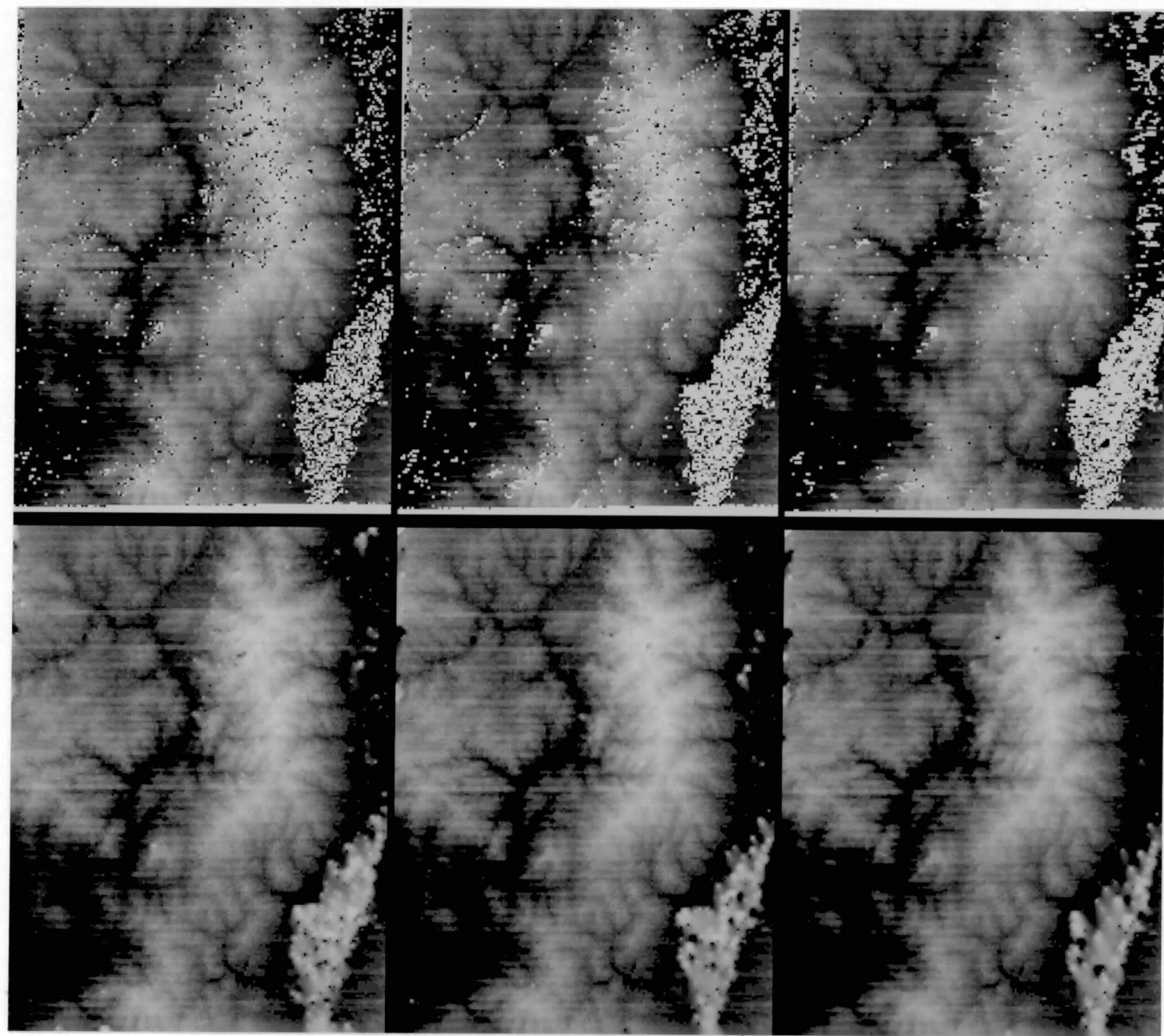
(3) 分散が V_{TH} より小さければ相関領域を大きくして、相関係数法により対応点を探索する。

(4) (2) (3) いずれの場合もマッチング時の相関係数 (相関係数の最高値) がある設定値 (R_{TH}) 以上かどうかを調べる。

(5) 相関係数が R_{TH} 以上ならばマッチング時の対応点の位置から高度を算出し、 R_{TH} より小さければ高度を算出しないで特定の高度をその点の高度とする。

以上の異常高度点対策の効果を見るためにランドサットTMデータを使って次のケースで高度算出を行った。基本の相関領域は 15×5 、大きくした相関領域は 31×5 、 $V_{TH}=85.0$ 、 $R_{TH}=0.5$ とした。 V_{TH} 、 R_{TH} は表7-3の分散と相関係数の異常群と正常群の平均値から定めた。特定高度としては 8191 m を用いた。

- ・ ケース1 分散および相関係数による判別を行わない。(図6-7、図6-9の画像はこのケースである)
- ・ ケース2 分散による判別は行わないで、相関係数が R_{TH} より小さい場合は特定高度とする。
- ・ ケース3 分散が V_{TH} より小さい場合は大きい相関領域を使用し、相関係数が R_{TH} より小さい場合は特定高度とする。



最初の算出
結果の画像

後処理後
の画像

ケース1

ケース2

ケース3

図7-6 分散および相関係数による判別を行った場合と行わない場合の画像

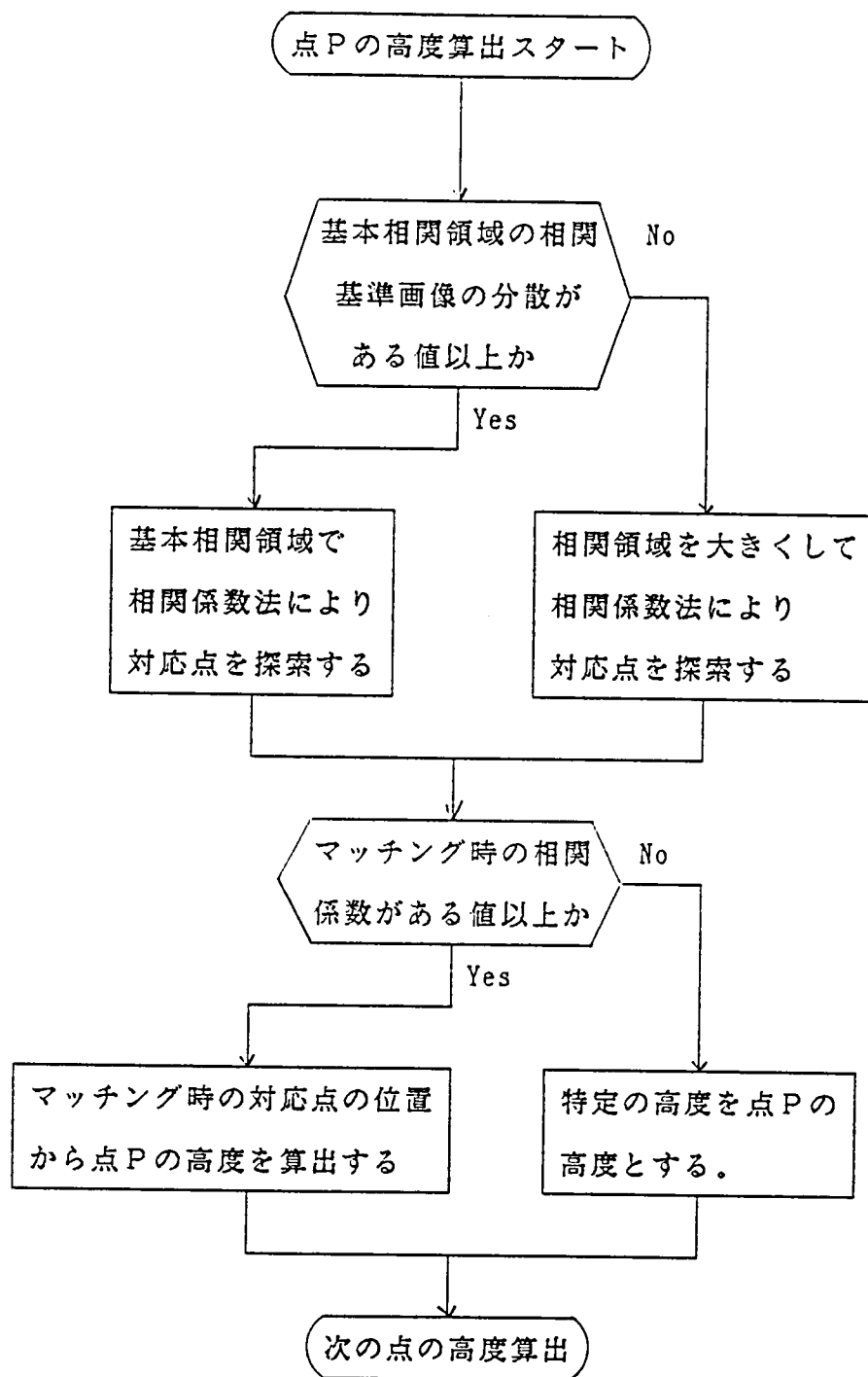


図7-5 分散と相関係数による異常高度点対策を含んだ
高度算出フローチャート

上の3つのケースの1次格子点の高度算出結果および6.9項で述べた2つの後処理を行った画像を図7-6に示す。ケース2の上の画像がケース1の画像に比べて白い点が多くなっているのは、相関係数が R_{TH} より小さい点が特定高度に置き換えられて白い点として出ているためである。しかし後処理後の画像を見るとケース1に比べて右上隅の異常高度点（原画像ではこの部分は市街地）が無くなっており、相関係数による異常高度点対策処理は効果があることを示している。ケース3の上の画像はケース2に比べてさらに、白い点が少なくなっており、また後処理後の画像を見ると、右側の異常高度点が殆ど無くなっている。また右下隅の雲による異常高度点のかたまりもなり小さくなっており、分散および相関係数による2段階の異常高度点対策は効果があることを示している。

7.3 異高度基準面GCPによる高度算出

7.3.1 異高度基準面GCPによる立体視画像作成

第6章で述べた高度算出システムでは、適当な高度の基準面を設定し、なるべくその平面内に含まれるGCPを使って立体視画像を作成する必要があった。しかし実際問題として高度がほぼ同じのGCPを選定することは難しいケースが多い。そこで高度の異なる基準面GCPを使用して立体視画像を作成する方法を研究した。図7-7に作成手順を示す。

(1) 選定した基準面GCPの地理的位置、原画像の座標および高度を測定する。

(2) 基準面GCPの原画像の座標から6.7項で説明した手順により、基準面GCPを観測したときの衛星位置を計算する。

(3) 基準面GCPの地理的位置、高度、およびGCP観測時の衛星位置の情報から、高度0 m平面での基準面GCPの視差を計算する。図7-8において高度 H_G の基準面GCPの左および右からの観測画像における高度0 m平面での視差は、それぞれ $\overline{G_O G_L}$ および $\overline{G_R G_O}$ である。それぞれの衛星と基準面GCPのGを含む平面は厳密には2~3°ずれているが、1つの平面と考えて視

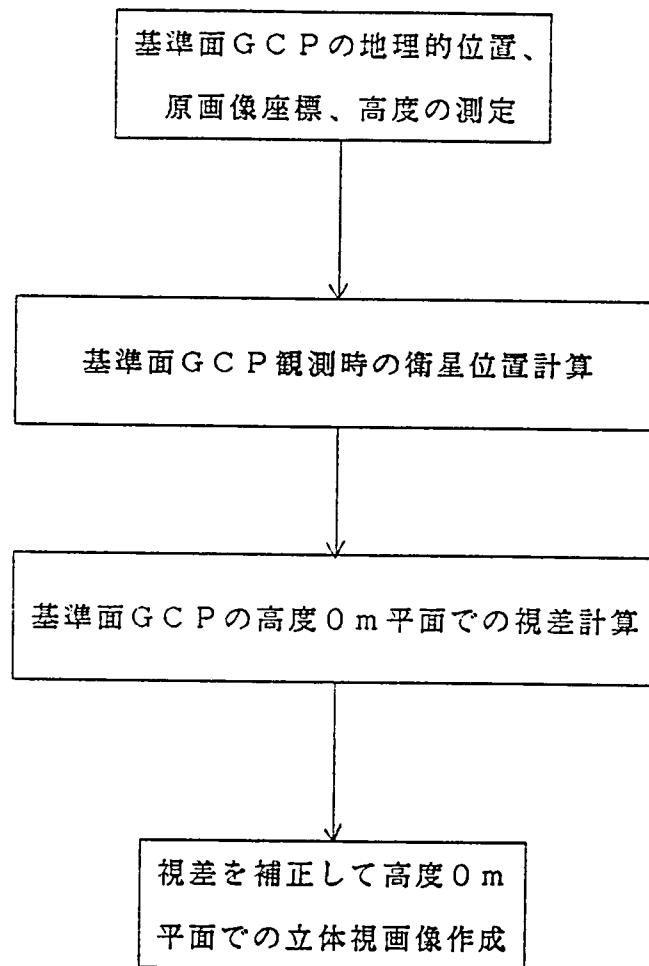
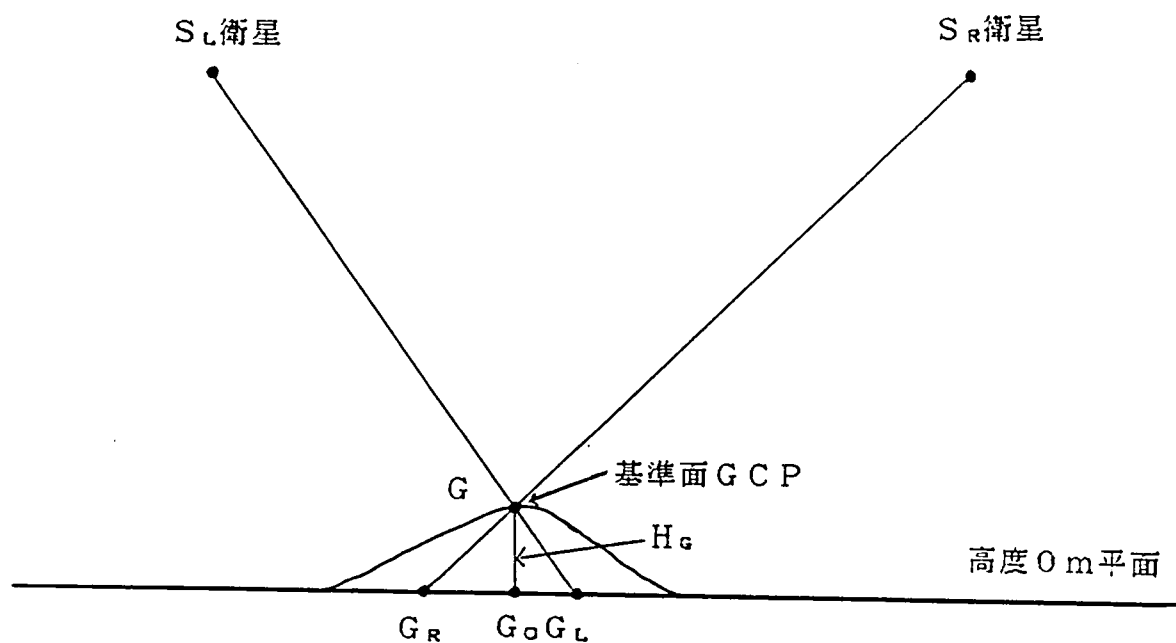


図 7 - 7 異高度基準面 G C P による立体視画像作成手順



$\overline{G_O G_L}$, $\overline{G_R G_O}$: 視差

図7-8 基準面GCPの高度0m平面での視差計算

差は画像の横座標（ピクセル方向）のみ計算した。

7.3.2 異高度基準面 G C P による高度算出の評価

- | | |
|------------------------|---------------------------------|
| ・基準面G C Pの高度により補正した場合 | 基準面の高度0 m |
| ・基準面G C Pの高度により補正しない場合 | 基準面の高度3 1 2 m、
基準面の傾き約0 . 3° |

7.4 本章の要約

表 7-6 異高度基準面 G C P による高度算出の評価に
使用した基準面 G C P の高度

G C P の番号	高 度 (m)	G C P の番号	高 度 (m)	G C P の番号	高 度 (m)
1	2 6 0	6	2 0 0	1 1	4 5 7
2	2 6 0	7	3 4 0	1 2	4 8 0
3	2 5 0	8	2 3 0	1 3	4 6 0
4	2 5 0	9	3 3 0		
5	2 2 0	1 0	3 2 0	平均	3 1 2

表 7-7 基準面 G C P の高度により補正した場合としない場合および
同一高度 3 点の G C P による場合の算出高度の誤差 (m)

場 合	r m s 誤差	誤差の絶対値 の平均
高度により補正した場合	4 9 . 4	4 3 . 5
高度により補正しない場合	8 4 . 2	7 3 . 1
同一高度 3 点の場合	3 2 . 9	2 3 . 7

(1) 現在斜め観測機能により、地表面の高度を計測することが出来る特長を持ったスポット衛星が打ち上げられている。又我が国も高度の計測機能を持った衛星（ERS-1）を開発している。これらの衛星の観測データを使って地表面高度の数値データ（DTM）を自動的に収集することが出来れば、未開発地域の地形図作成などに非常に有効である。

(2) 第6章で研究した衛星データによる高度算出方法には次のような課題がある。

(i) 対応点の誤探索による異常高度点が発生する。

(ii) 高度がほぼ同じの基準面GCPを選定しなければならない。

(iii) コンピュータの演算時間が長い。

本章は上の(i), (ii)の課題についての研究結果を述べたものである。

(3) 第6章で作成した衛星データによる高度算出画像において異常高度点が発生している部分の立体視画像を調べてみると市街地、山影のところが多かった。市街地は地形特徴がないため、また山影は輝度が低いため、対応点の誤探索が起こっていると考えられる。

(4) 異常高度点が発生しやすい市街地の周辺で異常高度および正常高度が算出されている点を、両者なるべく同じになるような割合でテストポイントを多数（125点）選定した。

(5) (4)で選定したテストポイントについて、相関基準画像（画像相関を行う場合の基準となる方の画像）の分散及び、相関係数法により探索した場合のマッチング時の相関係数を求め、その分散と相関係数を異常高度点と正常高度点の2つの群に分け、判別分析により異常群と正常群での特徴を調べた。

(6) 相関基準画像の分散による異常高度点の判別率はかなり高いが正常高度点の判別率はそれほど高くなかった。マッチング時の相関係数による異常高度点

および正常高度点の判別率は両方ともかなり高かった。これは次の事を示している。

(i) 相関基準画像の分散の値を調べることにより、異常高度点が算出される可能性をかなり高い確率（約80%）で予測できる。しかし分散の値は正常高度点が算出される可能性を示しているが、算出された高度の中には異常高度が含まれている割合はかなりある。

(ii) マッチング時の相関係数の値を調べることにより、算出高度が異常であるか正常であるかをかなり高い確率（約80%）で判別することが出来る。

ランドサットTMデータとスポットデータについて行ったがTMデータの方が判別率が高かった。

(7) 相関領域を大きくしてテストポイントの高度を算出し、異常高度点の数を調べてみるとかなり減少することを示した。横方向に約2倍に広げてみると1/2程度に減少していた。

(8) 相関基準画像の分散がある値より小さければ相関領域を大きくして対応点を探索し、マッチング時の相関係数がある値より小さければ高度を算出せずに特定高度とし、後処理で有効に利用する。この方法で高度算出を行ってみると異常高度点をかなり少なくすることが出来、分散および相関係数による2段階の異常高度点対策が有効であることを示した。

(9) 立体視画像を作成するために選定した基準面GCPの原画像の座標から、基準面GCPを観測したときの衛星位置を計算することが出来る。この時の衛星位置と基準面GCPの地理的位置、高度の値から基準面GCPの原画像における高度0m平面での視差を計算することが出来る。

(10) 基準面GCPの画像座標を上で計算した視差の量だけ補正して、高度0mの平面を基準面として立体視画像を作成することにより、基準面GCPの高度

を考慮した高度算出方法を考えた。

(11) 基準面の傾きが算出高度に大きく影響するスポットのパンクロデータを使って、高度の異なる基準面 G C P を使って、高度により補正した場合としない場合の立体視画像を作成し、算出高度の誤差を調べてみた。評価点 64 点の rms 誤差は高度により補正しない場合に比べて 84 m から 49 m に改善されており、この基準面 G C P の高度補正方法が有効であること示した。しかし同じ高度 3 点の基準面 G C P を使用した場合の 33 m よりは悪かった。この原因について今後検討してみる必要がある。

第8章 結論

衛星データは同時広域性、繰り返し観測性の特長を持っており、同一地域を異なった時期に観測したデータを重ね合わせる事によりいろいろな目的に応用することが出来る。重ね合わせデータを使用した場合の応用ケースとして次のような場合がある。

- ・ 重ね合わせデータによる土地被覆分類
- ・ 重ね合わせデータの差による地表面変化部分の抽出
- ・ 異方向観測データの重ね合わせによる地表面高度の算出

本研究は衛星データを上の3つのケースに応用する場合のデータ処理手法及び、その手法を応用した場合の衛星データの有効性あるいはデータ処理手法上の課題について研究したものである。即ち次の6項目について研究した。

- ・ 衛星データの重ね合わせ
- ・ 重ね合わせデータの土地被覆分類への応用
- ・ 重ね合わせデータの差による地表面変化部分の抽出
- ・ 差画像による地表面変化部分抽出への応用
- ・ 異方向観測データの重ね合わせによる地表面高度の算出
- ・ 衛星データによる地表面高度の算出における課題の研究

本研究により得られた主要な成果を要約すれば以下の通りである。

8.1 衛星データの重ね合わせ（第2章）

(1) 衛星による観測データは衛星の軌道・姿勢の変動、地球の自転などに起因する幾何学歪を持っており、地上局でこれらの歪を幾何学モデルにより補正（システム補正という）した形で一般に利用者に提供される。システム補正データは画像の縦、横方向が衛星の進行方向と走査方向になっていて、上が真北方向になった地形図に重なる形（地理補正という）になっていない。2段階処理方式により、システム補正データから広域の高精度に重なった地理補正画像を迅速に作成出来ることを示した。

(2) 先ず比較的小数の基準GCPを使って同一の地理補正座標上でリサンプリ

ングして粗い重ね合わせを行い、次に多数の重ね合わせ用GCPを使って精密な重ね合わせを行う。リサンプリング式としては第1段階ではアフィン変換式、第2段階では3次式で良いことを示した。多数の重ね合わせ用GCPの2つの画像間の対応点の座標を相関係数法を使って自動的に探索することにより、重ね合わせ処理を迅速に行うことが出来る。第1段階の粗い重ね合わせにより拡大、回転などの歪を除いておき、これにより第2段階のGCPの自動探索の成功率を高めることが出来る。これが2段階処理方式の利点である。

(3)大きさが約110km四方の画像の重ね合わせにおいて、重ね合わせ用GCPの数を20点以上選定すれば誤差が1画素程度になり、GCPをそれ以上多くしても精度はそれほど良くなることを示した。誤差が1画素程度であるのは、重ね合わせ用GCPの座標を探索時間を早くするために1画素単位の精度で求めたためであり、1画素以下の精度で求めれば誤差はもっと小さくなると考えられる。

8.2 重ね合わせデータの土地被覆分類への応用（第3章）

(1)同季節（11月同志）及び異季節（5月と11月）の重ね合わせデータを作成し、重ね合わせデータ使用による土地被覆分類の分類精度向上率を調べた。トレーニング領域の選定が正しいものとして、トレーニング領域のデータの選定されたカテゴリーへの分類比率により分類精度を調べた。2時期の重ね合わせデータを使用することにより土地被覆分類精度は、異季節の場合1時期の場合の約75%から約15%向上し、同季節の場合1時期の場合の約70%から約10%向上することを示した。

(2)重ね合わせデータを使用することにより分類精度が向上する要因としては次の2つが考えられる。

(i)それぞれの時期のデータから相関の低いバンドを抜き出して使用することが出来る。

(ii)それぞれの時期により分光反射特性が変化したデータを使用することが出

来る。

同季節の場合でも分類精度が向上しているのは(i)の要因によるものと考えられる。また(i)の要因の方が(ii)の要因より分類精度向上の寄与率が高いことを示した。

(3)土地被覆カテゴリーを市街地系、農地系、草地系、森林系、水系に大別すると、重ね合わせデータ使用による分類精度の向上率は農地系、草地系、市街地系、森林系、水系の順である事を示し、これは時期による分光反射特性の変化が大きいと考えられる順序になっている。

8.3 重ね合わせデータの差による地表面変化部分の抽出（第4章）

(1)重ね合わせデータの差画像から地表面が変化した部分を抽出しようとする場合、それぞれのデータの観測時の日射強度や大気による減衰量の相違による輝度の違いを補正してやる必要がある。この輝度補正の方法として地表面の変化していない部分を自動的に選別してその部分の画素のデータを使って回帰により補正する方法を開発した。この補正により地表面が変化していない部分は回帰により輝度が同じになり、変化していない部分は輝度が同じにならない。

(2)重ね合わせ画像 G_1 と G_2 の平均値と標準偏差を計算し、 G_2 の平均値を標準偏差を G_1 のそれに等しくした画像 G_2' を作成する。次に差画像 $G_2' - G_1$ において平均値（0になる）からの偏差が一定範囲内の画素（選別画素という）を選別し、その選別画素のまわりの 3×3 の画素の平均値のデータを使って画像 G_2 の輝度を G_1 の輝度に合わせる回帰式を求める。この式を使って画像 G_2 の輝度を変換した画像 G_2'' を作成した後、差画像 $G_2'' - G_1$ を作成する。地表面が変化した部分は差画像 $G_2'' - G_1$ において、平均値からずれた位置に来ることになり、抽出され易くなる。選別画素抽出のための差画像 $G_2' - G_1$ における平均値からの偏差の範囲は、後に行う回帰の残差の標準偏差が1レベル程度になるように設定すれば良い事を示した。

8.4 差画像による地表面変化部分抽出への応用（第5章）

(1) 松くい虫の被害が激しい地域を対象として、1972年と1980年に観測されたランドサットMSSデータを使って、その間に発生した松くい虫の被害領域を抽出する研究を行った。まず2時期の重ね合わせデータを使ってマルチスペクトル分類により松の領域を分類抽出した。次に重ね合わせデータから差画像を作成し、松の領域の中から松くい虫の被害によりランドサットデータが変化した部分を抜き出すことにより、松くい虫の被害領域を抽出する事が出来ることを示した。

(2) 松の分類抽出には2時期の重ね合わせデータのそれぞれの時期のバンド5と6のデータを使用した。松くい虫の被害地点ではバンド5が増加し、又バンド6が減少し、かつ被害が進むに従いバンド5の増加量およびバンド6の減少量が大きくなる傾向を示していた。2時期のバンド5と6の重ね合わせデータから選別画素間回帰により輝度補正を行った後、差画像を作成し、その差画像を使って、上で抽出した松の領域の中からバンド5が増加した領域およびバンド6が減少した領域を抜き出して、松くい虫の被害領域とした。バンド5の増加量およびバンド6の減少量の度合いにより被害の程度を3段階に分けた。

(3) 年々の松くい虫の被害量が市町村単位で地上で目視により調査されており、そのデータを使って1972年から1980年の間の累積被害量を計算した。ランドサットデータによる抽出結果から、市町村単位で各被害段階毎の面積を計算し、松の平均材積量と被害率から市町村毎の被害量を算出した。前者と後者の相関分析を行うと、両者の間には高い相関関係（ $r=0.824$ ）が見られた。しかし同じ対象領域で1981年から1982年までの期間で被害抽出を行うと、低い相関関係（ $r=0.045$ ）しか見られなかった。抽出期間が長ければ被害領域も大きくなり、ある程度被害が大きくなればランドサットデータは松くい虫の被害領域抽出に有効であることを示した。

8.5 異方向観測データに地表面高度の算出（第6章）

(1) 同一地域を2つの異なった方向から観測した衛星のシステム補正データを使って、地表面の高度を地球固定座標で3次元的に算出する方法を開発した。高度がほぼ同じのGCP（基準面GCP）を選定し、基準面GCPを含む平面で両方から観測した衛星データを重ね合わせた画像（立体視画像）を作成する。立体視画像間の対応点を相関係数法により自動的に探索し、対応点観測時の衛星位置をシステム補正時の衛星位置推定データから求める。基準面GCPの画像座標と緯経度座標のデータから両座標間の関係式を求め、この関係式を使って対応点の画像座標を緯経度座標に変換し、さらに地球固定座標に変換する。左右の対応点観測時の衛星位置と、それぞれの対応点を結ぶ2つの直線間の最短距離点を求め、対応点の高度を算出する。

(2) ランドサットTMおよびスポットのシステム補正データを使って上の方法により高度算出を行った。約60点の評価点の算出高度のrms誤差はランドサットTMデータで117m、スポットデータで30m（パンクロ）および39m（マルチスペクトル）であった。ランドサットTMデータの場合、対応点の探索において1画素以下を内挿して計算することにより93mに改善された。本研究で開発した3次元算出方法が、これまでの1次元算出方法より精度が良いことを示した。誤差の要因として対応点探索誤差、衛星位置推定誤差、基準面傾き誤差があり、ランドサットTMデータでは対応点探索誤差の要因が大きく、スポットデータの場合基準面傾き誤差の要因が大きい事を示した。いずれのデータでも衛星位置推定誤差の要因による算出高度の誤差は小さい。

(3) 地表面高度の自動算出において、立体視画像間の対応点の誤探索による異常高度点の発生は避けられないが、後処理によりかなり除去できることを示した。先ず周りの8点の平均値との差が一定値以上の点を異常高度点とし、次にそれらの高度を異常高度点以外の平均値で置き換える後処理を行った。

8.6 衛星データによる地表面高度の算出における課題の研究（第7章）

(1) 第6章で研究した衛星データによる高度算出方法における次の課題について対策研究を行った。

- ・ 立体視画像間対応点の誤探索により異常高度点が発生する。
- ・ 基準面の重ね合わせのために高度がほぼ同じ基準面 G C P を選定しなければならない。

異常高度および正常高度が算出されている点を多数テストポイントとして選定し、異常高度群と正常高度群に分け、各群の対応点探索時の相関基準画像の分散およびマッチング時の相関係数について判別分析を行い、その結果を基に異常高度点を少なくする高度算出手順を提案し、その効果を調べた。高度の異なる基準面 G C P を選定した場合、各 G C P の高度を補正して立体視画像を作成する方法を提案し、その効果を調べた。

(2) 異常／正常高度点の対応点探索時の相関基準画像の分散およびマッチング時の相関係数について判別分析を行い次の事を示した。

- (i) 相関基準画像の分散の値を調べることにより異常高度点が算出される可能性をかなり高い確率（約80%）で予測することが出来る。しかし分散の値は正常高度が算出される可能性を示しているが、算出された高度の中には異常高度が含まれている割合はかなりある。
- (ii) マッチング時の相関係数の値を調べることにより算出高度が異常であるか、正常であるかをかなり高い確率（約80%）で判別することが出来る。

また相関領域を大きくすると異常高度点の発生確率はかなり減った。以上の結果を基に相関基準画像の分散がある値より小さければ相関領域を大きくして対応点を探索し、マッチング時の相関係数がある値より小さければ高度を算出せずに特定高度とし、後処理で有効に利用する。この方法で高度算出を行ってみると、異常高度点をかなり少なくすることが出来、分散および相関係数による2段階の異常高度点対策が有効であることを示した。

(3) 異なった高度の基準面 G C P を使って立体視画像を作成する場合、基準面

G C Pを観測した時の衛星位置を求め、その衛星位置と基準面G C Pの地理的位置、高度の値から基準面G C Pの高度0 m平面での視差を計算することが出来る。基準面G C Pの画像座標を計算した視差の量だけ補正し、高度0 mの平面を高度算出の基準面として立体視画像を作成する。スポットのバンクローデータを使って高度の異なる基準面G C Pを使って、高度を補正した場合としない場合の立体視画像を作成し、算出高度のr m s誤差を調べてみると84 mから49 mに改善されており、この基準面G C Pの高度補正方法が有効であることを示した。しかし同じ高度3点の基準面G C Pを使用した場合の33 mよりは悪かった。この原因について今後検討してみる必要がある。

謝 辞

本論文は著者が（財）リモート・センシング技術センターにおいて行った研究業務の中から、主として「ランドサットデータによる松くい虫の被害領域の抽出」および「衛星データによる標高データ抽出法の開発」の成果を基に、著者が進めた研究結果をまとめたものである。

京都大学工学部長尾真教授には、衛星データによる地表面高度算出上の課題の研究および本論文の取りまとめに関して御指導、御鞭撻を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

「ランドサットデータによる松くい虫の被害領域の抽出」の研究は、林野庁の松くい虫被害対策事業の一環として行われたものであり、本研究を委託された林野庁および（社）日本林業技術協会の関係者各位に深く感謝します。本研究においてランドサットデータによる処理結果を評価して頂いた（社）日本林業技術協会の渡辺宏氏および若森邦保氏に深く感謝します。

「衛星データによる標高データ抽出法の開発」の研究は宇宙開発事業団の委託研究として行われたものであり、著者に本研究の機会を与えて頂いた宇宙開発事業団の関係者各位に深く感謝します。

本論文の作成に当たっては、（財）リモート・センシング技術センターの理事長、役員以下その他の皆様の御支援と激励を頂きました。皆様の温かい御支援と励ましの言葉がなかったら本論文は完成しなかったでしょう。ここに厚く感謝します。特にこの間、多くの業務を負担して頂き、著者に論文執筆の時間的余裕を与えてくれた研究部の皆様に深く感謝します。さらに本研究の遂行に当たり、その優れたプログラム開発能力で著者を助けてくれた杉村俊郎君に厚く感謝します。最後に著者の原稿を清書しきれいな論文に仕上げてくれた（財）リモート・センシング技術センターの漆原みゆき嬢に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) American Society of Photogrammetry; Manual of Remote Sensing,
2nd Edition, pp.517-570, 1982
- 2) 宇宙開発事業団 地球観測センター編：地球観測データ利用ハンドブック
ーランドサット編・改訂版ー、
pp.2-20-2-47、(財)リモート・センシング技術センター、1986
- 3) C.N.E.S et SPOT IMAGE:Guide des Utilisateurs de Donnees SPOT,
Vol.1 Manuel de Reference, 1986
- 4) 村井俊治、前田紘、奥田勉：地球資源衛星デジタルデータの地理的補正、
写真測量、Vol.13, No.4, pp.13-20, 1974
- 5) Bernstein, R.:Digital Image Processing of Earth Observation Sensor
Data, IBM Journal Research and Development, Vol.20, No.1, pp.40-57,
1976
- 6) 長尾真：リモートセンシングにおける画像処理、計測と制御、
Vol.15, No.7, pp.21-29, 1976
- 7) Wil, P.V. and Stein, M.:A Landsat Digital Image Rectification System,
IEEE Transactions on Geoscience Electronics, Vol.GE-15, No.3,
pp.130-137, 1977
- 8) Horn, B.K.P. and Woodham, R.J.:Landsat MSS Coordinate
Transformations, Proc. of Machine Processing of Remotely Sensed
Data Symposium, pp.59-68, 1979

- 9) Sawada, N., Kidode, M., Shinoda, H., Asada, H., Iwanaga, M., Watanabe, S., Mori, K. and Akiyama, M.: An Analytic Correction Method for Satellite MSS Geometric Distortion, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 47, No. 8, pp. 1195-1203, 1981
- 10) 井原広一、山本康成：地球観測衛星（ランドサット）画像の精密補正技術、電気学会雑誌、Vol. 101, No. 4, pp. 317-324, 1981
- 11) 小坂清隆、吉村文伸、井原広一、山本康成：衛星画像の幾何学的歪補正の精度向上に関する一考察、電気学会論文誌C、Vol. 103, No. 6, pp. 137-144, 1983
- 12) Friedmann, D. E., Friedel, J. P., Magnussen, K. L., Kwok, R. and Richardson, S.: Multiple Scene Precision Rectification of Spaceborn Imagery with Very Few Ground Control Points, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 49, No. 12, pp. 1657-1667, 1983
- 13) Ford, G. E. and Zanelli, C. I.: Analysis and Quantification of Errors in the Geometric Correction of Satellite Images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 51, No. 11, pp. 1725-1734, 1985
- 14) Salamonowick, P. H.: Satellite Orientation and Position for Geometric Correction of Scanner Imagery, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 4, pp. 491-499, 1986
- 15) 土屋清、新井康平、山浦雄一、石田中：ランドサットMSS画像の幾何学的歪の一検討、電子通信学会技術研究報告、Vol. 81, No. 41, pp. 55-60, 1981

- 16) Welch, R. and Usery, E.L.: Geometric Accuracy of Landsat-4 MSS Image Data, NASA Conf. Publ. No. NASA-CO-2355-Vol. 1, pp. I. 123-I. 132, 1985
- 17) Kaneko, T.: Evaluation of Landsat Image Registration Accuracy, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 42, No. 10, pp. 1285-1299, 1976
- 18) Lodwick G.D.: Between Scene Registration Accuracy in Landsat Time Sequencing, Proc. of the 12th International Symposium on Environment, pp. 1461-1470, 1978
- 19) 福田徹、館和夫、田中邦昭、福田雅之: LANDSAT・MSS画像重ね合わせ処理の一手法、第9回リモートセンシングシンポジウム資料、pp. 25-28, 1983
- 20) Benny, A.H.: Automatic Relocation of Ground Control Points in Landsat Imagery, Proc. of the Conference on Matching Remote Sensing Technologies and Their Applications, pp. 307-315, 1981
- 21) Barnea, D.I. and Silverman, H.F.: A Class of Algorithms for Fast Digital Image Registration, IEEE Transactions on Computers, Vol. C-21, No. 2, 1972
- 22) Anuta, P.A.: Spatial Recognition of Multispectral and Multitemporal Digital Imagery Using Fast Fourier Transform Techniques, IEEE Transactions on Geoscience Electronics, Vol. GE-8, pp. 353-368, 1970

- 23) 向井幸男、竹内章司：画像の自動マッチングを利用した2段階リサンプリング法によるデジタル画像の重ね合わせ、写真測量とリモートセンシング、Vol.25, No.2, pp.4-12, 1986
- 24) 坪川家恒、大森又吉：測地学序説、山海堂、PP.202~205, 1969 (初版)
- 25) 森本久弥：地図編集、(社)日本測量協会、PP.97-99, 1980 (第6版)
- 26) Chevrel,M., Courtois,M. and Weill,G, : The SPOT Satellite Remote Sensing Mission, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.47, No.8, pp.1163-1171,1981
- 27) Carlson,R.E. and Aspiazu,C. : Cropland Acreage Estimates from Temporal, Multispectral ERTS-1 Data, Remote Sensing of Environment, Vol.4, No.3, pp.237-243, 1975
- 28) Bizzell,R.M., Hall,A.H., Feiveson, M.E., Bauer, M.E., Davis,B.J., Malila,W.A. and Rice,P.C. : Results from the Crop Identification Technology Assenssment for Remote Sensing (CITARS) Project, Proc. of 10th International Symposium of on Remote Sensing of Environment, pp.1189-1198, 1975
- 29) Tanaka,S., Muranaka,Y., Miyazawa,H. and Suga,Y. : Multi-Seasonal Data Analysis and Extensions for Environmental Monitoring, Proc. of 11th International Symopsium on Remote Sensing of Environment, pp.545-561,1977

- 30) 村井俊治、奥田勉、松岡龍治：LANDSATの複数季節データを用いた土地被覆分類、日本写真測量学会 昭和53年度学術講演会発表論文集、pp.135-138, 1978
- 31) 向井幸男、竹内章司、杉村俊郎、日高清之：LANDSATデータを用いた農地の作付面積の算出、第4回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.147-150, 1978
- 32) Mukai, Y., and Takeuchi, S. : Estimation of Primary Production of Vegetation in Agricultural and Forested Areas Using Landsat Data, Proc. of 13th International Symposium on Remote Sensing of Environment, pp.1177-1188, 1979
- 33) Bauer, M.E., Cipra, J.E., Anuta, P.E. and Etherridge, J.E. : Identification and Area Estimation of Agricultural Crops by Computer Classification of Landsat MSS Data, Remote Sensing of Environment, Vol.8, No.1, pp.77-92, 1979
- 34) Badhwar, J.G., Carnes, J.G. and Austin, W.W. : Use of Landsat-Derived Temporal Profiles for Corn-Soybean Feature Extraction and Classification, Remote Sensing of Environment, Vol.12, No.1, pp.57-79, 1982
- 35) Abotten, R.A. : Principal Component Greenness Transformation in Multispectral Agricultural Landsat Data, Proc., of 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment, pp.765-774, 1978

- 36) 向井幸男、杉村俊郎、渡辺宏、畠村良二、中島巖、栗屋仁、大貫仁人：
ランドサットデータによる林相分類の研究、日本リモートセンシング学会、
第2回学術講演会論文集、pp.219-222 1982
- 37) Kauth,R.J. and Thomas,G.S. : The Tasseled Cap, A Graphic
Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural
Crops as Seen by Landsat, Proc. of Machine Processing of Remotely
Sensed Data Symposium, 1976
- 38) 奥野忠一、久米均、芳賀敏郎、吉澤正：多変量解析法、日科技連、第17
版、pp.159-175, 1980
- 39) Kawamura,J.G.:Automatic Recognition of Changes in Urban
Development from Aerial Photographs, IEEE Transactions on Systems,
Man and Cybernetics, Vol.SMC-1, No.3, pp.230-239, 1971
- 40) Lillestrand,R.L.:Techniques for Change Detection, IEEE
Transactions on Computers, Vol.C-21, No.7, pp,654-659, 1972
- 41) 落合弘明、竹内章司、土屋清：LANDSAT画像の解析と応用（1）－
土地利用の経年変化の検出－、第3回リモートセンシングシンポジウム
資料、pp.95-98, 1977
- 42) Weismiller,R.A., Kristof,S.J., Scholz,D.K., Anuta,P.E. and Momin,
S.A.: Change Detection in Coastal Zone Environments,
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.43, No.12, pp.
1533-1539, 1977

- 43) Howarth, P. J. and Wickware, G. M. : Procedures for Change Detection Using Landsat Digital Data, International Journal of Remote Sensing, Vol. 2, No. 3, pp. 277-291, 1981
- 44) Wickware, G. M. and Howarth, P. J. : Change Detection in the Peace-Athabasca Delta Using Digital Landsat Data, Remote Sensing of Environment, Vol. 11, No. 1, pp. 9-25, 1981
- 45) Wu, C. L., Landgrebe, D. A. and Swain, P. H. : The Decsion Tree Approach to Classification, Laboratory for Application of Remote Sensing, Information Note 090174, Purdue University, 1974
- 46) Stauffer, M. L. and Mckinney, R. L. : Landsat Image Differencing as a Change Detection Technique, Proc. of the Fall Technical Meeting, American Society of Photogrammetry, pp. 229, 1977
- 47) 竹内章司、木村宏、向井幸男、武田要 : LANDSATデータによる経年変化抽出の一方法、第5回リモートセンシングシンポジウム、pp. 95-98, 1979
- 48) 竹内章司、木村宏、向井幸男、武田要 : 画像間回帰によるランドサットデータの解析とその応用、第6回リモートセンシングシンポジウム、pp. 195-198, 1980
- 49) 向井幸男、植原茂次、大貫仁人、土屋清 : ランドサットデータによる火山噴火の降灰領域の抽出、第6回リモートセンシングシンポジウム、pp. 83-86, 1980

- 50) Eghbali, H.J. : K-S Test for Detecting Changes from Landsat Imagery Data, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-9, No.1, pp.17-23, 1979
- 51) 畠村良二、渡辺宏、向井幸男：ランドサットによる森林の転用と伐採地の抽出、日本写真測量学会 昭和55年度年次学術講演会発表論文集、pp.79-82, 1980
- 52) Robinove, C.J., Chavez, P.S., Gehling, D. and Holmgren, R. : Arid Land Monitoring Using Landsat Albedo Difference Images, Remote Sensing of Environment, Vol.11, No.2, pp.133-156, 1981
- 53) Frank, T.D. : Assessing Change in the Surficial Character of a Semiarid Environment with Landsat Residual Images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.50, No.4, pp.471-480, 1984
- 54) Todd, W.J. : Urban and Regional Land Use Change Detected by Using Landsat Data, Journal Research U.S. Geological Survey, Vol.5, No.5. pp.529-534, 1977
- 55) Howarth, P.J. and Boasson, E. : Landsat Digital Enhancement for Change Detection in Urban Environments, Remote Sensing of Environments, Vol.13, No.2, pp.149-160, 1983
- 56) Nelson, R.F. : Detecting Forest Canopy Change Due to Insect Activity Using Landsat MSS, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.49, No.9, pp.1303-1314, 1983
- 57) Byrne, G.F., Crapper, P.F. and Mayo, K.K. : Monitoring Land-Cover

- Change by Principal Component Analysis of Multitemporal Landsat Data, Remote Sensing of Environment, Vol.10, No.3, pp.175-190, 1980
- 58) 松岡龍治: LANDSAT MSSによる土地利用の変化検出、日本写真測量学会 昭和56年度年次学術講演会発表論文集、pp.19-24, 1981
- 59) Doob, J.L. : Heuristic Approach to the Kolmogorov-Smirnov Theorem, Ann. Math. Stat., Vol.20, pp.393-403, 1949
- 60) 向井幸男、竹内章司、杉村俊郎: 選別画素間回帰による画像の輝度補正、日本リモートセンシング学会 第6回学術講演会論文集、pp.1-4, 1986
- 61) 中山裕則、向井幸男、舘和夫、鈴木康志: 隣接するランドサットMSS画像の接合方法の研究、日本リモートセンシング学会 第4回学術講演会論文集、pp.85-88, 1984
- 62) 小原忠夫: 赤外カラー写真による松くい虫被害調査、森林航測、Vol.118, pp.11-16, 1978、
- 63) 渡辺宏、畠村良二: 空中写真と統計的手法を用いた、松くい虫防除の効果判定法、日本林学会 第91回大会発表論文集、pp.345-346, 1980
- 64) Klein, W.H.: Estimating Bark Beetle-killed Lodgepole Pine with High Altitude Panoramic Photography, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.48, No.5, pp.733-737, 1982
- 65) 向井幸男、渡辺宏、畠村良二、中島巖、大貫仁人: ランドサットデータによる松くい虫被害地域抽出の研究、日本リモートセンシング学会第1回学術講演会論文集、pp.129-130, 1981

- 66) 向井幸男、杉村俊郎、渡辺宏、若森邦保：ランドサットMSSデータによる松くい虫の被害領域の抽出、日本リモートセンシング学会誌、Vol.4, No.2, pp.5-18, 1984
- 67) Mukai, Y., Sugimura, T., Watanabe, H., and Wakamori, K.: Extraction of Areas Infested by Pine Bark Beetle Using Landsat MSS Data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.53, No.1, pp.77-81, 1987
- 68) American Society of Photogrammetry: Manual of Photogrammetry, 4th Edition, pp.3, 1980
- 69) Panton, D. J.: A Flexible Approach to Digital Stereo Mapping, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.44, No.12, pp.1499-1512, 1978
- 70) Hannah, M. J.: Error Detection and Correction in Digital Terrain Models, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.47, No.1, pp.63-69, 1981
- 71) Konecny, G. and Page, D.: Correlation Techniques and Devices, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.47, No.3, pp.323-333, 1981
- 72) 森忠次、服部進、今井啓介、小川一郎：画像相関を使った航空写真からの等高線自動図化の一方法—処理手法と自動標定、写真測量とリモートセンシング、Vol.20, No.4, pp.4-13, 1981

- 73) 村井俊治、河井康之：空中写真ステレオ画像の自動認識とDTMの自動作成、日本写真測量学会 昭和58年度年次学術講演会発表論文集、
pp.13-18, 1983
- 74) Welch, R. and Lo, C.P. : Height Measurements from Satellite Images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.43, No.10, pp.1233-1241, 1977
- 75) Simard, R. and Krishna, V.G. : A Successful Approach in Three-Dimensional Perception of Stereo Landsat-MSS Images over Cordilleran Relief, Proc. of 9th International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, pp.31-40, 1983
- 76) Simard, R., Oliver, R. and Pina, E. : Digital Elevation Modeling with Landsat-3 RBV Data, Proc. of the 18th International Symposium on Remote Sensing of Environment, pp.825-834, 1984
- 77) 土屋清、建石隆太郎、信田昌男：LANDSAT-4 MSSステレオ画像による3次元座標測定、写真測量とリモートセンシング、Vol.24, No.2, pp.4-14, 1985
- 78) 村井俊治、松岡龍治、宗岡慶太：ステレオ宇宙写真の3次元計測精度、日本写真測量学会 昭和60年度年次学術講演会発表論文集、
pp.81-84, 1985
- 79) 向井幸男、杉村俊郎、綾部広一、舘和夫、中沢孝：ランドサットTMデータのサイドラップ領域の高度データの自動算出、電子通信学会技術研究報告、Vol.86, No.80, pp.23-28, SANE 86-12, 1986

- 80) 向井幸男、杉村俊郎、飯島哲二：ランドサットMSSデータによる標高算出とその評価、第12回リモートセンシングシンポジウム、pp.9-12, 1986
- 81) 向井幸男、杉村俊郎：スポットHRVデータによる標高算出とその評価、日本リモートセンシング学会 第6回 学術講演会論文集、pp.49-52. 1986
- 82) Remapriyan, H. K., Strong, H. K., Hung, Y. and Murry, C. W. Jr.: Automated Matching of Pairs of SIR-B Images for Elevation Mapping, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-24, No. 4, pp. 462-472, 1986
- 83) 向井幸男、杉村俊郎、飯島哲二、綾部広一、舘和夫、中沢孝：ランドサットTMのシステム補正データを用いたサイドラップ領域の高度の算出、写真測量とリモートセンシング、特集号 I、pp. 25-35, 1987
- 84) 村井俊治：スポットHRVによる地形計測、写真測量とリモートセンシング、特集号 I、pp. 1-10, 1987
- 85) Konecny, C., Lohmann, P., Engel, H. and Kruck, E.: Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 53, No. 9, pp. 1223-1230, 1987
- 86) Ehlers, M. and Welch, R.: Stereocorrelation of Landsat TM Images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 53, No. 9, pp. 1231-1237, 1987

- 87) 村井俊治、建石隆太郎：標高メッシュデータを用いた地形の画像出力、
生産研究、Vol.30, No.7, pp.247-251, 1978
- 88) Colvocoresses, A.P.:Proposed Parameters for Mapsat,
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.45, No.4,
pp.501-506, 1979
- 89) Welch, R. and Marko, W.:Cartographic Potential of a Spacecraft
Line-Array Camera System:Stereosat, Photogrammetric Engineering
and Remote Sensing, Vol.47, No.8, pp.1173-1185, 1981
- 90) Brandenberger, A. J. and Ghosh, S. K.:The World's Topographic and
Cadastral Mapping Operation, Photogrammetric Engineering and Remote
Sensing, Vol.51, No.4, pp.437-444, 1985
- 91) 森忠次、服部進、内田修：分割画像との相関法による空中写真からの自
動図化、写真測量とリモートセンシング、Vol.24, No.1, pp.13-22, 1985
- 92) 向井幸男、杉村俊郎、綾部広一、新井康平、中沢孝：S P O Tデータによ
る高度算出における課題の研究、日本リモートセンシング学会 第7回
学術講演会論文集、pp.99-102, 1987
- 93) 田中豊、垂水共之、脇本和昌：パソコン統計解析ハンドブックⅡ 多変
量解析編、共立出版、pp.71-94, 1986

著者発表論文

1. 向井幸男：NOAA IRデータによる海面温度分布画像の作成、写真測量とリモートセンシング、Vol.15, No.4, pp.12-23, 1976
2. 向井幸男：NOAAの熱赤外映像データによる海面温度分布画像の作成、第14回イメージプロセッシング研究、Vol.14-2, pp.1-8, 1977
3. 向井幸男：NOAAの熱赤外映像データによる海面温度分布画像の作成、第3回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.103-106, 1977
4. 力丸厚、向井幸男：NOAA熱赤外映像からの雲域抽出の研究、第3回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.107-110, 1977
5. 平野政幸、向井幸男：航空機MSSデータを利用した植生図作り、日本写真測量学会 昭和53年度年次学術講演会論文集、pp.111-116, 1978
6. 竹内章司、向井幸男、杉村俊郎、日高清之：LANDSATデータを用いた農地の作付面積の算出、第4回リモートセンシングシンポジウム資料 pp.147-150, 1978
7. Mukai, Y., and Takeuchi, S.: Estimation of Primary Production of Vegetation in Agricultural and Forested Areas Using Landsat Data, Proc. of 13th International Symposium on Remote Sensing of Environment, pp.1177-1188, 1979
8. 加藤辰彦、西田宏、向井幸男：MSSデータによる水稻の収量予測、日本

9. 向井幸男、加藤辰彦、宗山敬、佐々木保徳：2つの高度のMSSデータによるバスラディアンスの計算、第5回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.15-18, 1979
10. 竹内章司、向井幸男、中島巖：LANDSATデータによる森林面積及び材積量の推定、第5回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.163-166, 1979
11. 竹内章司、木村宏、向井幸男、武田要：LANDSATデータによる経年変化抽出の一方法、第5回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.95-98, 1979
12. Mukai, Y., Takeuchi, S., Watanabe, H. and Hatamura, R.: Application of Landsat Data for the Management of Forest Resources, Proc. of XIVth International Society for Photogrammetry, Vol. XXIII, Part B10, pp.567-579, 1980
13. Mukai, Y. and Takeuchi, S.: Estimating Paddyfields Area from Landsat Data, Photo Interpretation 80-4, pp.2.1-2.6, 1980
14. Mukai, Y., Takeuchi, S., Watanabe, H. and Hatamura, R.: Forest Environmental Monitoring by the Use of Landsat Data, International Geographical Union, 1980
15. 向井幸男、幾志新吉、大貫仁人、土屋清：ランドサットデータによる火山噴火の降灰領域の抽出、第6回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.83-86, 1980

16. 五味謙隆、向井幸男、竹内章司：LANDSATでデータよる沖縄の自然環境、社会環境、第6回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.5-8, 1980
17. 新井康平、土屋清、石田中、向井幸男、竹内章司、飯嶋哲二：ランドサットMSS画像のゲインモードによるS/N比の違い、第6回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.107-110, 1980
18. 竹内章司、木村宏、向井幸男、武田要：画像間回帰によるランドサットデータの解析とその応用、第6回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.195-198, 1980
19. 向井幸男、新井康平、成ヶ沢憲太郎：地上、航空機、ランドサットにおける放射強度の測定とそれによる大気透過率、バスラディアンズの推定、第7回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.113-116, 1981
20. 大串融、向井幸男、佐野正春、西代孝、細井義孝、横山威生：LANDSAT解析による東北地方の地質区分、物理探査学会 Vol.34, No.4, pp.82-99, 1981
21. 向井幸男、渡辺宏、畠村良二、中島巖、大貫仁人：ランドサットデータによるマツクイムシの被害地域抽出の研究、日本リモートセンシング学会 第1回学術講演会論文集、pp.129-132, 1981
22. 木村宏、竹内章司、向井幸男、武田要：LANDSATデータと国土数値情報を用いた土地利用経年変化の抽出、日本写真測量学会 昭和56年度年次学術講演会論文集、pp.49-54, 1981

23. 渡辺和男、向井幸男、田中總太郎、竹内章司：災害のリモートセンシング、予防時報、 No.131, 1982
24. 新井康平、山本芳樹、向井幸男、瀬戸島政博：土地被覆分類結果を指標としたランドサットMSSデータの検証、第8回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.165-168, 1982
25. 向井幸男、杉村俊郎、山本芳樹、新井康平、瀬戸島政博：マルチスペクトル画像処理における分類法と分類に有用なスペクトルバンドに関する研究、日本リモートセンシング学会 第2回学術講演会論文集、pp.49-54, 1982
26. 向井幸男、杉村俊郎、渡辺宏、畠村良二、栗屋仁：ランドサットデータによる林相分類の研究、日本リモートセンシング学会 第2回学術講演会論文集、pp.219-222, 1982
27. 向井幸男、竹内章司、杉村俊郎：相関係数計算法による広域画像の重ね合わせ、第9回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.29-32, 1983
28. 向井幸男、杉村俊郎、渡辺宏、若森邦保：県単位程度の広い範囲の対象領域のランドサットデータによる松くい虫の被害領域の抽出、日本リモートセンシング学会 第3回学術講演会論文集、pp.163-166, 1983
29. 竹内章司、向井幸男：ランドサットデータによる58.4.27森林火災被害領域の抽出、日本リモートセンシング学会 第3回学術講演会論文集、pp.167-170, 1983
30. Mukai, Y., Sugimura, T., Nakajima, I., Watanabe, H. and Wakamori, K.

:Extraction of Damaged Areas by the Pine Beetle Using Landsat Data, Proc. of XVth International society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXV, Part A8, pp.507-517, 1984

31. 向井幸男、杉村俊郎、渡辺宏、若森邦保：ランドサットMSSデータによる松くい虫の被害領域の抽出、日本リモートセンシング学会誌、Vol. 4, No. 2, pp. 5-18, 1984
32. 向井幸男、竹内章司、杉村俊郎：相関係数計算法による画像の重ね合わせ、第29回（昭和59年後期）情報処理学会全国大会講演論文集、pp. 1103-1104, 1984
33. 向井幸男、渡辺宏、和田幸生：ランドサットMSSデータと航空機MSSデータによる林相分類結果の比較、日本リモートセンシング学会第4回学術講演会論文集、pp. 205-208, 1984
34. 飯嶋哲二、木村宏、向井幸男、山本静夫、島野洋介：ランドサットMSSデータの木目状ノイズの特性とその除去の研究、日本リモートセンシング学会第4回学術講演会論文集、pp. 47-50, 1984
35. 嶋本孝平、内田修、村上尚武、舘和夫、向井幸男、杉村俊郎：ランドサットMSSデータのサイドラップ領域を利用した高度情報の算出、日本リモートセンシング学会第4回学術講演会論文集、pp. 99-102, 1984
36. 中山裕則、竹内章司、向井幸男、舘和夫、鈴木康志：隣接するランドサットMSS画像の接合手法の研究、日本リモートセンシング学会第4回学術講演会論文集、pp. 85-88, 1984
37. 中山裕則、向井幸男、山本静夫：TMの熱バンドデータと地表面温度と

- の関係の調査、日本リモートセンシング学会 第5回学術講演会論文集、
pp.95-98, 1985
38. 向井幸男、杉村俊郎：ランドサットTMデータとMSSデータの土地被
覆分類結果の比較、日本リモートセンシング学会 第5回学術講演会論
文集、pp.61-64, 1985
39. 渡辺宏、若森邦保、向井幸男：LANDSAT数値データによる樹種判
別の精度、第97回日本林学会講演論文集、pp.151-152, 1986
40. 向井幸男、竹内章司：画像の自動マッチングを利用した2段階リサン
ピング法によるデジタル画像の重ね合わせ、写真測量とリモートセン
シング Vol.25, No.2, pp.4-12, 1986
41. 向井幸男、杉村俊郎、綾部広一、舘和夫、中沢孝：ランドサットTMデ
ータによるサイドラップ領域の標高算出、日本写真測量学会 昭和61
年度年次学術講演会論文集、pp.19-24, 1986
42. 向井幸男、杉村俊郎、綾部広一、舘和夫、中沢孝：ランドサットTMデ
ータのサイドラップ領域の高度データの自動算出、電子通信学会技術研
究報告（宇宙・航行エレクトロニクス）、Vol.86, No.80, pp.23-28,
1986
43. 向井幸男、竹内章司、杉村俊郎：選別画素間回帰による画像の輝度補正、
日本リモートセンシング学会 第6回学術講演会論文集、pp.1-4, 1986
44. 中山裕則、木村宏、向井幸男：SAR-580データによる土地被覆分類の検
討、日本リモートセンシング学会 第6回学術講演会論文集、
pp.97-100, 1986

45. 向井幸男、杉村俊郎、飯嶋哲二：ランドサットMSSデータによる標高算出とその評価、第12回リモートセンシングシンポジウム資料、pp.21-24, 1986
46. 向井幸男、杉村俊郎：スポットHRVによる標高算出とその評価、日本リモートセンシング学会 第6回学術講演会論文集、pp.49-52, 1986
47. Mukai, Y., Sugimura, T., Watanabe, H. and Wakamori, K.: Extraction of Areas Infested by Pine Bark Beetle Using Landsat MSS Data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.53, No.1 pp.77-81, 1987
48. 向井幸男：リモートセンシング技術の応用（その8）－データの取得と画像処理の実際－、農業土木学会誌、Vol.55, No.4, pp.347-354, 1987
49. 向井幸男、杉村俊郎、飯嶋哲二、綾部広一、舘和夫、中沢孝：ランドサットTMのシステム補正データを用いたサイドラップ領域の高度算出、写真測量とリモートセンシング、特集号I、pp.25-35, 1987
50. Mukai, Y., Sugimura, T., Iijima, T., Ayabe, K., Tachi, K. and Nakazawa, T.: Automatic Computation of Elevation Data of Side-Lap Area Using System Corrected Landsat TM data, XXXVIIIth International Astronautical Congress, 1987
51. Nakayama, Y., Kimura, H. and Mukai, Y.: A Study of the Accuracy of Land Cover Classification by SAR Image, XXXVIIIth International Astronautical Congress, 1987

52. 向井幸男、杉村俊郎、綾部広一、新井康平、中沢孝：SPOTデータによる高度算出における課題の研究、日本リモートセンシング学会 第7回学術講演会論文集、pp.99-102, 1987

53. ナクイ モハマッド、鈴木務、新井郁男、向井幸男：Land Area Classification & Data Comparison of Two Landsat TM Temporal Imageries, 電子通信学会技術研究報告（宇宙・航行エレクトロニクス）、SANE 87-60, pp.39-45, 1988